

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Vladimir Dika

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

doc. dr. sc. Ana Pilipović, dipl. ing.

Student:

Vladimir Dika

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno primjenjujući znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu, te pod stručnim vodstvom doc. dr. sc. Ane Pilipović, dipl. ing.

Zahvaljujem mentorici doc. dr. sc. Ani Pilipović, dipl. ing. što mi je pomogla kod odabira teme za diplomski rad, te na pruženoj pomoći, savjetima i razumijevanju tijekom izrade teoretskog i eksperimentalnog dijela rada.

Zahvaljujem se Mireli Petranović iz *Laboratorija za polimere i kompozite* sa *Zavoda za materijale* na pruženoj stručnoj pomoći pri izradi eksperimentalnog dijela rada.

Zahvaljujem se doc. dr. sc. Ivanu Stojanoviću, dipl. ing. i djelatnicima *Laboratorija za zaštitu materijala* sa *Zavoda za zavarane konstrukcije* na pruženoj stručnoj pomoći pri izradi eksperimentalnog dijela rada.

Zahvaljujem svojoj obitelji na bezuvjetnoj podršci i razumijevanju tijekom studija.

Vladimir Dika



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Vladimir Dika**

Mat. br.: 0035187182

Naslov rada na
hrvatskom jeziku: **Prerada kompozita podtlačnim ulijeivanjem**

Naslov rada na
engleskom jeziku: **Production of Composite with Resin Infusion Process**

Opis zadatka:

Postoje mnogi postupci prerade kompozitnih tvorevina. Oni se dijele ovisno o tome da li je riječ o otvorenim ili zatvorenim kalupima, te da li se vlakna postavljaju suha ili već natopljena smolom. Velika prednost nekih postupaka prerade kompozita je primjena podtlaka za uklanjanje zaostalih mjehurića zraka i lakše popunjavanje vlakana smolom.

U radu je potrebno načiniti pregled najčešće primjenjivanih materijala vlakana i matrice za preradu polimernih kompozita te opisati postupak podtlačnog ulijeivanja i njegove inačice uz navođenje prednosti i nedostataka.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je izraditi kompozitnu tvorevinu postupkom podtlačnog ulijeivanja s opisivanjem svake faze postupka. Također je potrebno načiniti kompozitne tvorevine s različitim načinom slaganja vlakana uz opisivanje eventualnih grešaka koje su se javile tijekom postupka prerade.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

28. rujna 2017.

Datum predaje rada:

30. studenog 2017.

Predviđeni datum obrane:

6., 7. i 8. prosinca 2017.

Zadatak zadao:

Ana Pilipović
Doc. dr. sc. Ana Pilipović

Predsjednica Povjerenstva:

Biserka Runje
Prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	I
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
POPIS KRATICA	VII
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY	X
1. UVOD.....	1
2. KOMPOZITNI MATERIJALI.....	2
2.1. Povijest primjene kompozitnih materijala	2
2.2. Definicija i podjela kompozitnih materijala.....	6
3. VLAKNIMA OJAČANI KOMPOZITI	9
3.1. Podjela vlaknima ojačanih kompozita	9
3.2. Svojstva vlaknima ojačanih kompozita.....	10
3.3. Materijali za izradu matrica kompozita	13
3.3.1. Nezasićene poliesterske smole.....	13
3.3.1.1. Struktura poliesterske smole	13
3.3.1.2. Umreživanje poliesterske smole	14
3.3.1.3. Svojstva poliesterske smole	14
3.3.2. Vinil-esterske smole.....	15
3.3.2.1. Struktura vinil-esterske smole.....	15
3.3.2.2. Umreživanje vinil-esterske smole.....	15
3.3.2.3. Svojstva vinil-esterske smole.....	15
3.3.3. Epoksidne smole	16
3.3.3.1. Struktura epoksidne smole	16
3.3.3.2. Umreživanje epoksidne smole	16
3.3.3.3. Svojstva epoksidne smole	16
3.3.4. Ostali sustavi duromernih smola.....	17
3.3.4.1. Fenolne (fenol-formaldehid) smole	17
3.3.4.2. Silikonske smole	17
3.3.4.3. Poliiimidne smole	17
3.3.4.4. Furanske smole	17

3.3.5.	Dodaci smolama.....	18
3.3.6.	Plastomerne matrice	18
3.4.	Materijali za izradu ojačavala kompozita	19
3.4.1.	Staklena vlakna	19
3.4.1.1.	Proizvodnja staklenih vlakana	20
3.4.1.2.	Apretiranje staklenih vlakana	20
3.4.1.3.	Svojstva staklenih vlakana	21
3.4.1.4.	Primjena staklenih vlakana	21
3.4.2.	Grafitna i ugljična vlakna.....	21
3.4.2.1.	Proizvodnja grafitnih i ugljičnih vlakana.....	22
3.4.2.2.	Svojstva grafitnih i ugljičnih vlakana	23
3.4.2.3.	Primjena ugljičnih vlakana	24
3.4.3.	Aramidna vlakna	24
3.4.3.1.	Proizvodnja aramidnih vlakana.....	25
3.4.3.2.	Svojstva aramidnih vlakana	25
3.4.3.3.	Primjena aramidnih vlakana	26
3.4.4.	Hibridna vlakna.....	26
3.4.5.	Polietilenska vlaknina	27
3.4.6.	Borna vlakna	27
3.4.7.	Keramička vlakna	28
3.4.8.	Vlakna biljnog porijekla	28
3.5.	Vrste vlaknastih ojačavala	30
3.5.1.	Ojačavala s diskontinuiranim vlaknima.....	30
3.5.2.	Ojačavala s kontinuiranim vlaknima	31
3.5.2.1.	Predimpregnirana vlakna ili prepreg.....	32
3.5.2.2.	Tkane tkanine.....	33
3.5.2.3.	Pletene tkanine	35
3.5.3.	Mat ojačavala	37
3.6.	Sendvič konstrukcije	38
3.6.1.	Pjenaste jezgre	39
3.6.1.1.	Poli(vinil-klorid)ne (PVC) pjene	39
3.6.1.2.	Poliuretanske (PUR) pjene.....	40
3.6.1.3.	Polistirenske (PS) pjene	41
3.6.1.4.	Poli(etilen-tereftalat)ne (PET) pjene.....	42
3.6.1.5.	Poli(metakril-imid)ne (PMI) pjene	42
3.6.1.6.	Poli(eter-imid)ne (PEI) pjene.....	42
3.6.1.7.	Kopolimerna stiren/akrilonitrilne (SAN) pjene	42
3.6.2.	Jezgre u obliku saća	43

3.6.2.1.	Aluminijske saće	43
3.6.2.2.	Nomex saće	44
3.6.2.3.	Plastomerne saća	45
3.6.3.	Drvene jezgre	45
3.6.3.1.	Balsa	45
3.6.4.	Svojstva jezgri	46
3.6.5.	Soric	47
3.6.6.	Coromat	48
4.	POSTUPAK PODTLAČNOG ULIJEVANJA	49
4.1.	Inačice postupka podtlačnog ulijevanja	50
4.1.1.	Postupak podtlačnog injekcijskog prešanja kapljevite smole (VARTM)	50
4.1.2.	Postupak podtlačnog ulijevanja Seeman (SCRIMP)	51
4.1.3.	Postupak utjecanja na sabijenost predoblika podtlakom (VIPR)	51
4.2.	Postupka podtlačnog ulijevanja	52
4.2.1.	Priprema površine kalupa	52
4.2.2.	Oblikovanje predoblika	53
4.2.3.	Postavljanje spiralnih cijevi	55
4.2.4.	Zatvaranje kalupa folijom za brtvljenje	56
4.2.5.	Spajanje i postizanje brtvljenja cijevi s kalupom	57
4.2.6.	Postizanje podtlaka i priprema smole	58
4.2.7.	Podtlačno ulijevanje smole u kalup	59
4.2.8.	Umreživanje i vađenje kompozita iz kalupa	60
4.3.	Prednosti i nedostaci postupka podtlačnog ulijevanja	61
4.3.1.	Prednosti podtlačnog ulijevanja	61
4.3.2.	Nedostaci podtlačnog ulijevanja	62
4.4.	Analiza parametara postupka podtlačnog ulijevanja	66
4.4.1.	Sabijenost ojačavala	66
4.4.2.	Propusnost ojačavala	67
4.4.3.	Strategija impregnacije ojačavala	68
4.4.4.	Položaj sloja materijala za poboljšanje protoka smole	70
4.5.	Ispitivanje mehaničkih svojstava kompozita izrađenih postupkom VIP	70
4.5.1.	Utjecaj vrste proizvodnog postupka na mehanička svojstva kompozitne tvorevine	70
4.5.1.1.	Materijali za izradu uzoraka i postupci preradbe	71

4.5.1.2.	Postupci ispitivanja	73
4.5.1.3.	Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava	75
4.5.2.	Utjecaj redoslijeda tkanina u laminatu na mehanička svojstva kompozitne tvorevine	81
4.5.2.1.	Materijali za izradu uzoraka	81
4.5.2.2.	Postupci ispitivanja	82
4.5.2.3.	Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava	83
4.5.2.4.	Morfologija površine loma	85
4.5.3.	Zaključci ispitivanja mehaničkih svojstava	89
5.	POSTUPCI ZAVRŠNE OBRADE	91
5.1.	Postupci obrade odvajanjem čestica	91
5.1.1.	Piljenje i okrajčivanje (uklanjanje srha, e. deflashing)	91
5.1.2.	Bušenje	92
5.1.3.	Blanjanje	92
5.1.4.	Tokarenje	92
5.2.	Površinska obrada	92
5.2.1.	Poliranje	92
5.2.2.	Jetkanje	93
5.2.3.	Bojenje	93
5.3.	Postupci spajanja	93
5.3.1.	Lijepljenje	93
5.3.2.	Zakivanje	94
5.3.3.	Povezivanje vijkom	94
6.	EKSPERIMENTALNI DIO	95
6.1.	Ciljevi ispitivanja	95
6.2.	Postupak podtlačnog ulijevanja	96
6.3.	Rezultati ispitivanja	103
7.	ZAKLJUČAK	110
	LITERATURA	111

POPIS SLIKA

Slika 3.1. Odnos smole i vlakana	11
Slika 3.2. Kristalna struktura grafita.....	23
Slika 3.3. Osnovna ponavljajuća jedinica.....	24
Slika 3.4. Utjecaj usmjerenja vlakana obzirom na naprezanje	29
Slika 3.5. Dijagram naprezanje – istezanje vlaknima ojačanog kompozita	29
Slika 3.6. Različiti tipovi ojačavala s kontinuiranim vlaknima	31
Slika 3.7. Prepreg: a) shematski prikaz postupka izrade, b) rola prepreg trake	32
Slika 3.8. Tipovi tkanih tkanina: a) obično tkanje, b) košara tkanje, c) satensko tkanje, d) keper tkanje	34
Slika 3.9. Tipovi pletenih tkanina.....	35
Slika 3.10. Cjevasto pletena tkanina: a) izrada b) kvaliteta površine.....	36
Slika 3.11. Mat ojačavala: a) prošiveni mat sa sjeckanim vlaknima, b) mat s kontinuiranim vlaknima	37
Slika 3.12. Elementi sendvič konstrukcije.....	38
Slika 3.13. Ploča PVC pjene a) obična ravna, b) ravna s urezanim kanalima.....	40
Slika 3.14. PET pjena	42
Slika 3.15. Aluminijske saće debljine $h = 10$ mm	44
Slika 3.16. Nomex saće	44
Slika 3.17. Balsa jezgre	46
Slika 3.18. Svojstva jezgrenih materijala	46
Slika 3.19. <i>Soric</i> tkanina.....	47
Slika 3.20. <i>Coromat</i> tkanina	48
Slika 4.1. Postupak podtlačnog ulijevanja (VIP).....	49
Slika 4.2. VARTM postupak	50
Slika 4.3. SCRIMP postupak	51
Slika 4.4. VIPR postupak	52
Slika 4.5. Materijal za poboljšavanje protoka: a) između laminata, b) na sloju <i>peel-ply</i>	54
Slika 4.6. Pozicija spiralne cijevi u kalupu: a) jedna nasuprot drugoj, b) uz rub kalupa	55
Slika 4.7. Komponente postupka podtlačnog ulijevanja	60
Slika 4.8. Prikaz a) površinskih mikroporoznosti i b) unutrašnjih mikrošupljina.....	63
Slika 4.9. Primjer simulacije punjenja kalupa	63

Slika 4.10. Prikaz simulacije povrata materijala	65
Slika 4.11. Raspored toka smole kroz debljinu predoblika	68
Slika 4.12. Ovisnost položaja fronte toka o načinu postavljanja linije za dobavu smole.....	69
Slika 4.13. Shema prošivene tkanine [M/90/0]	71
Slika 4.14. Dimenzije ispitnih tijela za ispitivanje mehaničkih svojstava.....	74
Slika 4.15. Dijagram a) rastezno naprezanje – istezanje, b) pritisno naprezanje – deformacija	75
Slika 4.16. Prikaz a) dijagrama smičnog naprezanja, b) ispitak VI i HL nakon ispitivanja....	76
Slika 4.17. Dijagram rastezno naprezanje – istezanje	78
Slika 4.18. Pritisno naprezanje – deformacija	79
Slika 4.19. Prikaz a) dijagrama smičnog naprezanja, b) ispitak HYB nakon ispitivanja.....	80
Slika 4.20. Kompozitna ploča s iscertanim uzorcima za ispitivanje	83
Slika 4.21. Rezultati: a) rastezne i b) savojne čvrstoće	84
Slika 4.22. Varijacija a) smične čvrstoće i b) žilavosti	85
Slika 4.23. Ispitno tijelo za rastezno ispitivanje	86
Slika 4.24. Ispitno tijelo za savojno ispitivanje	87
Slika 4.25. Ispitno tijelo za a) smično ispitivanje b) ispitivanje žilavosti	88
Slika 6.1. Raspored materijala u kompozitnoj ploči.....	95
Slika 6.2. Kalup s trakom za brtvljenje folije	96
Slika 6.3. Položaj slojeva laminata (mat, prošivena tkanina, pjenasta PET jezgra)	97
Slika 6.4. Postavljanje sloja a) prošivenih tkanina, b) <i>peel ply</i> na već postavljene slojeve ojačavala	98
Slika 6.5. Postavljanje i pričvršćivanje spiralne cijevi	98
Slika 6.6. Postavljanje linije dobave smole i podtlačne linije	99
Slika 6.7. Zatvaranje kalupa folijom za brtvljenje.....	100
Slika 6.8. Postizanje podtlaka u kalupu	101
Slika 6.9. Podtlačno ulijevanje smole u kalup	102
Slika 6.10. Umrežena kompozitna tvorevina.....	102
Slika 6.11. Greške prilikom podtlačnog ulijevanja	103
Slika 6.12. Područje suhog mata	104
Slika 6.13. Zarobljeni zrak u smoli na površini ispitnog tijela.....	104
Slika 6.14. Ispitno tijelo s prijelazom mata na tkaninu na donjoj površini	105
Slika 6.15. Dimenzije zarobljenog zraka na donjoj strani ispitnog tijela	106

Slika 6.16. Dubina prodiranja smole u PET pjenastu jezgru	107
Slika 6.17. Pucanje matrice uzrokovano izrezivanjem ispitnog tijela	107
Slika 6.18. Ispitna tijela nakon postupka žarenja	108

POPIS TABLICA

Tablica 3.1.	Mehanička svojstva staklenih vlakana.....	21
Tablica 3.2.	Mehanička svojstva ugljičnih vlakana.....	24
Tablica 3.3.	Mehanička svojstva aramidnih vlakana.....	26
Tablica 3.4.	Mehanička svojstva polietilenskih vlakana	27
Tablica 3.5.	Svojstva kontinuiranih jednosmjernih vlaknima ojačanih kompozita.....	28
Tablica 4.1.	Podaci o materijalima i postupku izrade uzoraka	72
Tablica 4.2.	Podaci o materijalima i postupku izrade hibridnih uzoraka	73
Tablica 4.3.	Maseni udio vlakana za uzorke HL i VI.....	75
Tablica 4.4.	Rastezna i pritisna svojstva za uzorke HL i VI.....	76
Tablica 4.5.	Maseni udio vlakna za uzorke HYB	77
Tablica 4.6.	Rastezna i pritisna svojstva za uzorke HYB	79
Tablica 4.7.	Redoslijed slojeva u laminatu	82
Tablica 6.1.	Svojstva poliesterske smole <i>Aropol® G 105 E</i>	101
Tablica 6.2.	Maseni udio vlakana ispitnih tijala	108

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$D_{vl.}$	mm	promjer vlakna
E	kN/mm^2	Youngov modul
E_c	kN/mm^2	modul pritiskosti
E_r	kN/mm^2	modul rasteznosti
h	mm	debljina kompozitne tvorevine
h_1	mm	debljina sloja materijala predoblika
h_2	mm	debljina sloja materijala za poboljšavanje protoka smole (debljina infuzijske mreže)
$L_v.$	mm	duljina viskera
$L_{vl.}$	mm	duljina vlakna
n		broj rovinga do točke križanja
p_0	Pa	tlak ulijevanja smole
R_m	N/mm^2	rastezna čvrstoća
R_p	N/mm^2	prekidna čvrstoća
s	mm	pomak
SG		specifična gravitacija
$wt\%$		maseni udio vlakana
α	°	kut pletenja uzice ili kut nagiba
α	1/K	toplinska rastezljivost
ε	%	istezanje
θ	°C	temperatura
ρ	kg/m^3	gustoća

σ	N/mm^2	naprezanje
σ_B	N/mm^2	pritisna prekidna čvrstoća
σ_{cm}	N/mm^2	pritisna čvrstoća
σ_{fm}	N/mm^2	savojna čvrstoća

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
ABS	akrilonitril/butadien/stiren
Al ₂ O ₃	aluminijev oksid
ASTM	Američki odjel međunarodnog udruženja za ispitivanje materijala (e. <i>American Section for Testing Materials</i>)
BMC	vlaknasti prepreg (e. <i>bulk moulding compound</i>)
BW	tkana tkanina u oblik košare (e. <i>basket weave</i>)
CaO	kalcijev oksid
CFM	mat s kontinuiranim vlaknima (e. <i>continuous filament mat</i>)
CSM	mat sa sjeckanim vlaknima (e. <i>chopped strand mat</i>)
CSM-WR	kombinirane tkanine (e. <i>combination fabrics</i>)
EN ISO	europska norma Međunarodna organizacija za standardizaciju (e. <i>European norm International Organization for Standardization</i>)
FRP	polimer ojačan vlaknima (e. <i>fibre reinforce polymer</i>)
H	vodik
MgO	magnezijev oksid
MSC	postupak višestupanjskog umreživanja (e. <i>multi-stage curing</i>)
O	kisik
PAN	poliakrilonitril
PC	plikarbonat
PE	polietilen
PEEK	poli(eter-eter-keton)
PEI	poli(eter-imid)
PET	poli(etilen-tereftalat)
PF	fenol - formaldehidna smola
PIR	poliizocijanurat
PMC	kompozit s polimernom matricom (e. <i>polymer matrix composite</i>)
PMI	poli(metakril-imid)

PP	polipropilen
PPS	poli(fenil-sulfid)
PPTA	poli(para-fenilentereftalamid)
PS	polistiren
PUR	poliuretan
PVC	poli(vinil-klorid)
PVD	postupak fizikalnog prevlačenja (e. <i>physical vapour deposition</i>)
PW	obično tkana tkanina (e. <i>plain weave</i>)
RIRM	postupak injekcijskog prešanja recirkulirajuće smole (e. <i>resin injection recirculation method</i>)
RTM	postupka injekcijskog – posrednog prešanja kapljevite smole s uloženim trodimenzionalnim ojačavajućim predoblikom (e. <i>resin transfer moulding</i>)
SAN	stiren/akrilonitril kopolimer
SCRIMP	postupak podtlačnog ulijevanja Seeman (e. <i>Seeman composite resin infusion molding process</i>)
SEM	pretražni elektronski mikroskop (e. <i>scanning electronic microscope</i>)
SiO ₂	silicijev dioksid
SMC	osmoljeni mat (e. <i>sheet moulding compound</i>)
SW	satensko tkana tkanina (e. <i>satin weave</i>)
UTM	univerzalni uređaj za ispitivanje (e. <i>universal testing machine</i>)
UV	ultraviolettne zrake
VARTM	podtlačno injekcijsko prešanje kapljevite smole (e. <i>vacuum-assisted resin transfer moulding</i>)
VIP	postupak podtlačnog ulijevanja (e. <i>vacuum infusion process</i>)
VIPR	postupak utjecanja na sabijenost predoblika podtlakom (e. <i>vacuum induced preform relaxation</i>)
VOC	hlapljivi organski spojevi (e. <i>volatile organic compounds</i>)
WR	tkani roving (e. <i>woven roving</i>)

SAŽETAK

U ovom radu dan je kratki pregled razvoja kompozitnih materijala s naglaskom na polimerne kompozitne materijale. Nadalje, definiran je pojam kompozitne tvorevine i dan je pregled nekih od najvažnijih kriterija podjele kompozita. Naglasak je stavljen na vlaknima ojačane polimerne kompozite, stoga su pobliže opisani materijali koji se primjenjuju pri njihovoj izradi. Dan je pregled materijala matrica, duromernih i plastomernih, te materijala za izradu ojačavala. Pobliže je opisan postupak podtlačnog ulijevanja s time da je ukazano na varijabilnosti koje ovaj postupak pruža. Također naglašeno je kako još uvijek nedostaju modeli i računalne simulacije koje bi obuhvatile sve te moguće varijacije postupka. Teoretski dio rada zaokružen je opisom postupaka završne obrade kalupljenih kompozitnih tvorevina.

U eksperimentalnom dijelu rada izrađena je kompozitna ploča postupkom podtlačnog ulijevanja primjenjujući teoretska znanja opisana u prethodnim poglavljima. Greške koje su se pojavile na gotovom proizvodu popisane su i opisane kako bi se kod ponavljanja postupka mogle izbjeći.

Ključne riječi:

matrica, ojačavalo, podtlačno ulijevanje, vlaknima ojačani polimer.

SUMMARY

This paper gives a brief overview of the development of composite materials with an emphasis on polymer composite materials. Furthermore, the concept of composite structure is defined and an overview of some of the most important composite division criteria is given. The emphasis is placed on fibre reinforced polymer composites, hence the materials used in their manufacture are more closely described. An overview of thermosetting and thermoplastic matrices and reinforcement materials is given. The resin infusion process is described in more detail with reference to its variability. It also emphasizes that models and computer simulations are still missing, encompassing all possible variations of the process. The theoretical part of the paper is rounded by a description of the finishing process of moulded composite structures.

In the experimental part of the paper, the composite plate was made by the resin infusion process using the theoretical knowledge described in the previous chapters. The errors that appeared on the finished part were listed and described so that they could be avoided in the repetition of the process.

Key words:

matrix, fibre reinforcement, resin infusion process, fibre reinforced polymer.

1. UVOD

Postoje mnogi različiti proizvodni postupci koji su se razvili za izradu kompozita s polimernom matricom. Ti postupci su prilagođeni ili razvijeni kako bi se odgovorilo na različite potrebe kao što su novi sustavi vlakana ili matrica, geometrijska ograničenja kompozitnih tvorevina, multifunkcionalnost proizvoda, povećanje specifičnih fizičkih, električnih ili mehaničkih svojstva, ekonomičnost, itd.

Industrija kompozita i dalje se bavi razvojem novih proizvodnih postupaka koji će omogućiti proizvodnju kompozitnih dijelova više kvalitete sa smanjenim troškovima. Pored razvoja novih postupaka, usvajanjem i primjenom fundamentalne znanosti u proizvodnim postupcima ubrzalo se poboljšanje proizvodnih postupaka. Znanstveni pristup uz analitičko modeliranje i numeričke simulacije danas se primjenjuje za predviđanje fizike i reakcija tijekom proizvodnih postupaka prije ulaganja u prototipnu proizvodnju i testiranja. Varijabilnost od jednog do drugog proizvoda također se mogu smanjiti poboljšanjem materijala i uvođenjem postupaka prerade koje mogu proizvesti proizvode bez grešaka sa željenim svojstvima, usprkos nepoželjnim ali neizbježnim varijacijama materijala ili procesnih uvjeta tijekom izrade. Povezivanje konstruiranja konstrukcijskih kompozita s postupkom proizvodnje i montaže je potencijalni budući trend za industriju kompozita. Kako bi se ubrzao rast primjene kompozitnih materijala u različitim industrijama potrebno je nastaviti poboljšavati proizvodnju kompozita uz razvoj novih materijala uz niže troškove.

U nastavku rada dan je kratak pregled povijesnog razvoja izrade kompozita, a nakon što je definiran pojam polimernog kompozita kratko su opisane komponente koje ga čine. Fokus ovog rada je postupak podtlačnog ulijevanja i njegove inačice koje se primjenjuju u industriji.

2. KOMPOZITNI MATERIJALI

Iako su taljena staklena vlakna bila poznata prije više od 3000 godina, njihov potencijal kao materijal za ojačavanje nije bio prepoznat do uvođenja plastičnih materijala tijekom prošlog stoljeća. Zapravo, osim prirodnih kompozita (npr. u obliku drva), može se reći da je današnja industrija kompozita rođena uvođenjem prvih duromera (fenola) 1909. godine. Međutim, tek je 1940-ih godina došlo do rasta industrije konstrukcijskih kompozita čime je započelo „Doba sintetskih kompozitnih materijala“.[1] U nastavku teksta dan je kratki pregled povijesnog razvoja kompozita s naglaskom na polimerne materijale ojačane vlaknima.

2.1. Povijest primjene kompozitnih materijala

- **Stari vijek [2]**

Oko 3400. g. pr. Kr. u Mezopotamiji, ljudi su lijepili drvene trake pod različitim kutovima kako bi izradili dijelove slične današnjoj šperploči. Ujedno to je jedan od najranijih primjera primjene kompozitnog materijala. Između 2180. – 2055. g. pr. Kr. Egipćani su upotrebljavali slojeve platna ili papirusa natopljenog gipsom za izradu maski nakon smrti. Oko 1500. g. pr. Kr. u Egiptu i Mezopotamiji upotrebljeni su prirodni kompozitni građevni materijali budući da su drevni graditelji i obrtnici upotrebljavali slamu kako bi ojačali cigle od blata, glineno posuđe i čamce.

- **1200-ih [2]**

Otprilike 1200. g. Mongoli su izumili prve kompozitne lukove izrađene kombinacijom drva, bambusa, kostiju, tetiva stoke, rogova i svile povezane s prirodnom borovom smolom. Lukovi su bili mali, vrlo snažni i iznimno točni. Kompozitni mongolski lukovi bili su najstrašnije oružje na zemlji do izuma učinkovitog vatrenog oružja u 14. stoljeću.

- **1800-ih [2]**

Od 1870. do 1890. došlo je do revolucije u kemiji. Polimerizacija je omogućila da se nove sintetske smole preoblikuju iz kapljevitog u kruto stanje (odnosno umreženu molekularnu strukturu). Rane sintetske smole uključivale su celuloid, melamin i bakelit.

- **1900-ih [2]**

Početak 1900-ih razvijene su plastike kao što su vinil, polistiren, fenol i poliestar. Usporedno s razvojem tih materijala javlja se potreba za ojačavalima kako bi se poboljšala čvrstoća i krutost materijala.

Bakelit ili fenol – formaldehidna smola (PF), je prva izumljena sintetska plastika. To je smola nastala reakcijom eliminacije fenola s formaldehidom. Razvio ga je belgijski kemičar Leo Baekeland u New Yorku 1907. godine. Bakelit je upotrebljavan zbog svoje električne otpornosti i postojanosti na temperaturu u električnim izolatorima, radiju i telefonskim kućistima, te raznovrsnim proizvodima kao što je kuhinjsko posuđe, nakit i dječje igračke. Američko kemijsko društvo je 1993. godine bakelit proglasilo nacionalnim povijesnim kemijskim spomenikom zbog njegove važnosti kao prve sintetske plastike na svijetu.

- **1930-a**

Tridesete su možda najvažnije desetljeće za industriju kompozita. Godine 1935. Owens Corning je pokrenuo industriju polimera ojačanih vlaknima (e. *fibre reinforce polymer*, FRP) predstavivši prvo stakleno vlakno. [2] Godine 1936. patentirana je nezasićena poliesterska smola u SAD-u, dok je epoksidna smola razvijena 1937. godine u Europi. [1] Poliesterska smola je zbog svojeg svojstava umreživanja postala dominantni izbor smole u proizvodnji. Godine 1938. i druge smole s dobrim svojstvima postale su komercijalno dostupne. [2]

- **1940-a**

Drugi svjetski rat je industriju polimera ojačanih vlaknima premjestio s istraživanja u stvarnu proizvodnju. Uz svojstvo visoke čvrstoće u odnosu na masu, utvrđeno je da su kompozitne tvorevine sa staklenim vlaknima prozirne tj. propusne za radiofrekvencije. [2] Oko 1942. u SAD-u glavna komercijalna uporaba polimera ojačanih vlaknima bila je za izrada radarskih kupola i ostalih elektroničkih uređaja u zrakoplovstvu. Rane radarske kupole proizvedene su od staklenih vlakana u obliku fine tkanine. [1] Osim toga u ratu su razvijeni prvi trupovi brodova, te iako nisu bili primijenjeni u ratu, postupak je komercijaliziran nakon rata. [2] Od 1947. godine više pažnje je posvećeno stvaranju jeftinijih oblika ojačavala, odnosno osim tkanina po prvi put se pojavio mat sa sjeckanim vlaknima (e. *chopped strand mat*, CSM). [1] Iste godine napravljen je i testiran automobil s potpuno kompozitnom oplatom. Taj je automobil bio razmjerno uspješan i doveo je do razvoja *Corvette* 1953. godine izrađene od staklenih vlakana impregniranih smolom i oblikovane u metalnom kalupu. Tijekom tog razdoblja razvijeno je nekoliko postupka oblikovanja od kojih su dva najvažnija postupka oblikovanja u automobilskoj i ostalim industrijama, tlačno oblikovanje osmoljenog mata (e. *sheet moulding compound*, SMC) i oblikovanje vlaknastog preprega (e. *bulk moulding compound*, BMC). [2] Kako su se

razvile specijalizirane nezasićene poliesterske smole postojeane na kemikalije i temperaturu, tako se razvila i industrija FRP cijevi i spremnika za kemikalije te obloga od polimera ojačanih vlaknima. [1]

- **1950-a**

Oko 1950. godine postalo je moguće komercijalno proizvoditi epoksidnu smolu kada je epiklorhidrin postao uvelike dostupniji. Uporaba epoksidnih smola ojačanih vlaknima neraskidivo je povezana sa zrakoplovnom industrijom i to ne samo zbog toga što se opskrba može vršiti u obliku predimpregniranog (prepreg) materijala. Razvojem smola, 1950-tih godina ubrzao se i razvoj vlakana, te se uvode vlakna od E stakla, R stakla, S stakla i posebnih stakla postojanih na kiseline i alkale. Osim toga, postupci obrade tekstila omogućili su obradu staklenih rovinga u raznolike vrste tkanina, koji su stavljeni na tržište u obliku mata sa sjeckanim vlaknima, tkanih rovinga (e. *woven roving*, WR), križno šivanih rovinga (e. *stitched cross-ply roving*), kombinirane tkanine (e. *combination fabrics*, CSM-WR), te raznih vrsta tkanina. [1] Također početkom 1950-ih razvijeni su proizvodni postupci kao što su pultrudiranje, podtlačno oblikovanje vrećom i namotavanje filamena za tvorevine velikih dimenzija. Namotavanje filamena postalo je temelj velikim raketnim motorima koji su potakli istraživanje svemira i dalje u 1960-ima. [2]

- **1960-a**

Staklena vlakna bila su glavno ojačavalo za industriju polimera ojačanih vlaknima, ali potreba za lakšim, jačim i čvršćim strukturama dovela je do proizvodnje i primjene ugljičnih i aramidnih vlakana u kompozitima.

Ugljična vlakna nisu novi materijal, jer su prvi put uporabljena prije stotinu godina kao niti za električne svjetiljke. To prvo vlakno bilo je relativno slabo i nije se moglo primijeniti kao ojačavalo. Godine 1961. patentirano je prvo ugljično vlakno, a razvojem druge generacije ugljičnih vlakana 1963. godine njihova primjena u polimerima ojačanim vlaknima je ograničena za specijalizirane primjene. [1] Proći će još nekoliko godina prije negoli kompoziti od ugljičnih vlakana postanu komercijalno dostupni. Ugljična vlakna poboljšala su odnos čvrstoće prema masi tvorevina načinjenih od duromera te njihove krutosti, čime je njihova primjena još više porasla u zrakoplovnoj, automobilskoj, sportskoj industriji te robi široke potrošnje. [2]

Aramidna vlakna su prvi put razvijena 1965. godine i premda nisu tako čvrsta ili kruta kao ugljična vlakna, ona nude znatne prednosti u odnosu na staklena vlakna. Lakša su od

ugljičnih vlakana, manje skupa i pokazuju izuzetnu žilavost. U industriji polimera ojačanih vlaknima, aramidna vlakna primjenjuju se za konstrukciju boca pod tlakom (plinskih boca), zrakoplovnu primjenu, te za sportsku opremu. [1]

Uvođenjem ugljičnih i aramidnih vlakana te tkanjem sa staklenim vlaknima dovelo je do razvoja hibridnih tkanina gdje se optimalna svojstva različitih vlakana mogu iskoristiti uz optimum troškova. [1] Pomorsko tržište bilo je najveći potrošač kompozitnih materijala u 1960-ima. [2]

- **1970-ih i 1980-ih [2]**

Razvoj vlakana potkraj 1960-ih doveo je do proizvodnje vlakana od polietilena vrlo velike molekularne mase početkom 1970-ih. Napredak u proizvodnji vlakana doveo je do značajnog napretka u zrakoplovnim komponentama, strukturnoj i osobnoj zaštiti, sportskoj opremi, medicinskim uređajima i mnogim drugim primjenama. Nove i poboljšane smole nastavile su proširivati tržište kompozita, posebice za primjenu u područjima viših temperatura i korozivne okoline. U 1970-ima tržište automobila nadmašilo je pomorsko tržište, a tu poziciju je zadržalo do danas.

- **1990-ih i 2000-ih [2]**

Do sredine 1990-ih, kompoziti su ušli u masovnu proizvodnju. Kao troškovno učinkovita zamjena tradicionalnih materijala kao što su metalni i sintetski duromeri, konstruktori i inženjeri počeli su primjenjivati duromerne kompozite za različite komponente u konstrukcijskoj, električnoj, transportnoj industriji i industriji kućanskih uređaja.

Potrošači svaki dan dolaze u kontakt s kompozitnim proizvodima: ručke i prekidači na plinskim štednjacima, unutrašnjost električne infrastrukture radi sigurne i učinkovite isporuke električne energije, te mnoge druge. Kompoziti su također počeli utjecati na tržište prijenosa električne energije s proizvodima kao što su kablovi i izolatori.

Nastavak razvoja postupaka prevlačenja, kao što su postupak fizikalnog prevlačenja (e. *physical vapour deposition*, PVD) i THERMTIAL[™], povećao je broj primjene kompozita u automobilskoj industriji, te u industriji kućanskih uređaja. Kompoziti su tek počeli pronalaziti svoj put u nanotehnologiju.

- **Budućnost [2]**

Istraživanje kompozita privlači potpore od vlada, proizvođača i sveučilišta. Te će investicije pomoći kod pronalaska novih vlakana i smola. Ekološki prihvatljive smole sadržavat će recikliranu plastiku i polimere na bio-bazi za proizvodnju čvršćih, lakših i ekološki prihvatljivih kompozitnih proizvoda.

2.2. Definicija i podjela kompozitnih materijala

Nakon pregleda povijesnog razvoja kompozitnih materijala potrebno je definirati pojam „kompozitnog materijala“. Jednostavna definicija kompozitnog materijala može biti: „kompozitni materijal je onaj u kojem se dva ili više materijala međusobno povezuju kako bi oblikovali treći materijal.“ Iako nije netočna, ova definicija je preširoka jer gotovo sve metalne legure, polimeri i keramike zadovoljavaju tu široku definiciju kompozita, budući da svi ti materijali sadrže više od jednog tipa elementarnih atoma. [3]

Druga definicija "kompozitnog materijala", koja uključuje referencu fizičke veličine, je sljedeća: „Kompozitni materijal je materijalni sustav koji se sastoji od dva ili više materijala koji su različiti na fizičkoj skali većoj od $1\ \mu\text{m}$ (10^{-6} m) i koji su povezani na atomskoj i / ili molekularnoj razini.“ [3] Odnosno „Kompozit je materijal koji je nastao kombinacijom dvaju ili više materijala na makroskopskoj razini kako bi se stvorio koristan materijal koji često ima svojstva koje nijedna od komponenata ne posjeduje samostalno.“ [1]

Najprikladnija definicija koja povezuje sve već napisano sažeta je u sljedećoj definiciji: „Kompozitni materijali su homogeni materijali proizvedeni umjetnim spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstava s ciljem dobivanja materijala specifičnih karakteristika i svojstava kakva ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe“. [4] Kompozitni materijal sastoji se od osnovnog materijala (matrice) i dodatnog materijala (ojačavala i / ili punila). [5] Kompoziti se mogu podijeliti s obzirom na materijal matrice i materijal ojačavala na [4]:

- metalno-metalne
- metalno-keramičke
- metalno-polimerne
- keramičko-keramičke
- keramičko-polimerne
- polimerno-polimerne
- polimerno-metalne kompozite.

U svim kompozitima ojačavalo je ugrađeno u matricu pa se kompozitni materijali često dijele na temelju upotrebljenog matričnog materijala, umjesto materijala za ojačavala. [3] Odnosno upravo navedeno vodi nas do temeljne podjele kompozita na: metalne kompozite, keramičke kompozite i polimerne kompozite. Kod toga se pretpostavlja da je matrica: metalna, keramička, odnosno polimerna, te da joj se pridodaju najrazličitiji dodaci u cilju modificiranja

njenih svojstava, odnosno postizanja cilja koji je naveden u definiciji tj. da se dobije materijal svojstava kakva ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe. [4]

Osim prema materijalu matrice, kompoziti se mogu podijeliti prema:

- materijalu ojačavala na kompozite ojačane: [3]
 - staklenim vlaknima
 - ugljičnim / grafitnim vlaknima
 - aramidnim vlaknima, itd.
- obliku ojačavala na: [4]
 - kompozite s česticama
 - vlaknima ojačane kompozite
 - slojevite kompozite
 - sendvič konstrukcije.
- rasporedu ojačavala na kompozite s: [5]
 - ortogonalno raspoređenim vlaknima
 - višesmjerno usmjerenim vlaknima
 - kontinuiranim jednosmjernim vlaknima, itd.
- postupku izrade kompozita na: [5]
 - ručni dodirni postupak laminiranja
 - dodirni postupak sa štrcanjem
 - pultrudiranje
 - namotavanje filamenata
 - podtlačno oblikovanje vrećom
 - podtlačno ulijevanje, itd.
- prema primjeni kompozita na: [5]
 - konstrukcijske
 - elektrotehničke, itd.

Neki od razloga primjene kompozitnih materijala dani su u nastavku: [6]

- povišenje krutosti, čvrstoće i dimenzijske stabilnosti
- povišenje savojne žilavosti
- povišenje toplinske postojanosti
- sniženje troškova
- sniženje apsorpcije vode
- sniženje toplinsku rastezljivost
- poboljšanje postojanosti na trošenje
- veća korozijska postojanost
- smanjenje mase
- poboljšana konstrukcijska fleksibilnost.

U sljedećem poglavlju detaljnije je obrađeno područje polimernih kompozita s naglaskom na polimerne materijale ojačane vlaknima i njihova svojstva.

3. VLAKNIMA OJAČANI KOMPOZITI

Od svih vrsta kompozita, kod vlaknima ojačanih kompozita dolazi do najvećeg izražaja poboljšanje čvrstoće, žilavosti, krutosti, te povećanja specifične čvrstoće, tj. omjera čvrstoće i gustoće, uslijed ugradnje čvrstih, krutih i krhkih vlakana ojačavala u mekaniju, duktilniju matricu niske gustoće. Materijal matrice povezuje vlakna te prenosi i raspoređuje vanjska naprezanja na vlakna ojačavala. Matrica osigurava duktilnost i žilavost, budući da vlakna nose veći dio opterećenja što podrazumijeva također da je modul elastičnosti vlakna mnogo viši od modula elastičnosti matrice. [4]

3.1. Podjela vlaknima ojačanih kompozita

Kao i u prethodnom poglavlju, vlaknima ojačane kompozite dijelimo prema:

- vrsti materijala matrice na: [3]
 - polimerne kompozite
 - metalne kompozite
 - keramičke kompozite.

Najčešće upotrebljavani vlaknima ojačani kompoziti imaju polimernu matricu. [3]

- vrsti materijala ojačava na kompozite: [3]
 - sa staklenim vlaknima
 - s ugljičnim ili grafitnim vlaknima
 - s aramidnim vlaknima
 - s hibridnim vlaknima.

Premda se upotrebljavaju još neki materijali za izradu vlakana ojačavala, najčešće upotrebljavana vlakna su upravo prva tri navedena: staklena, ugljična i aramidana vlakna. [3]

- veličini ojačavala na kompozite s: [3]
 - viskerima
 - kratkim (diskontinuiranim) vlaknima
 - kontinuiranim vlaknima.

Viskeri su vrlo tanka vlakna odnosno sićušni monokristali koji imaju ekstremno veliki omjer duljine i promjera. Duljina viskera je $L_v = 10$ mm, dok je duljina kratkih ili sjeckanih vlakana $L_{vl} = 10 - 200$ mm. Kontinuirana vlakna su gotovo „beskonačna“. [3]

Osim prema duljini, vlakna se mogu podijeliti i prema promjeru, stoga se ojačavala prema promjeru dijele na: viskere, vlakna i žice. Promjer vlakana je $D_{vl.} = 5 - 200 \mu m$. [4]

- prema orijentaciji ojačavala na kompozite s: [7]
 - jednosmjerno orijentiranim ojačavalima
 - višesmjerno orijentiranim ojačavalima.

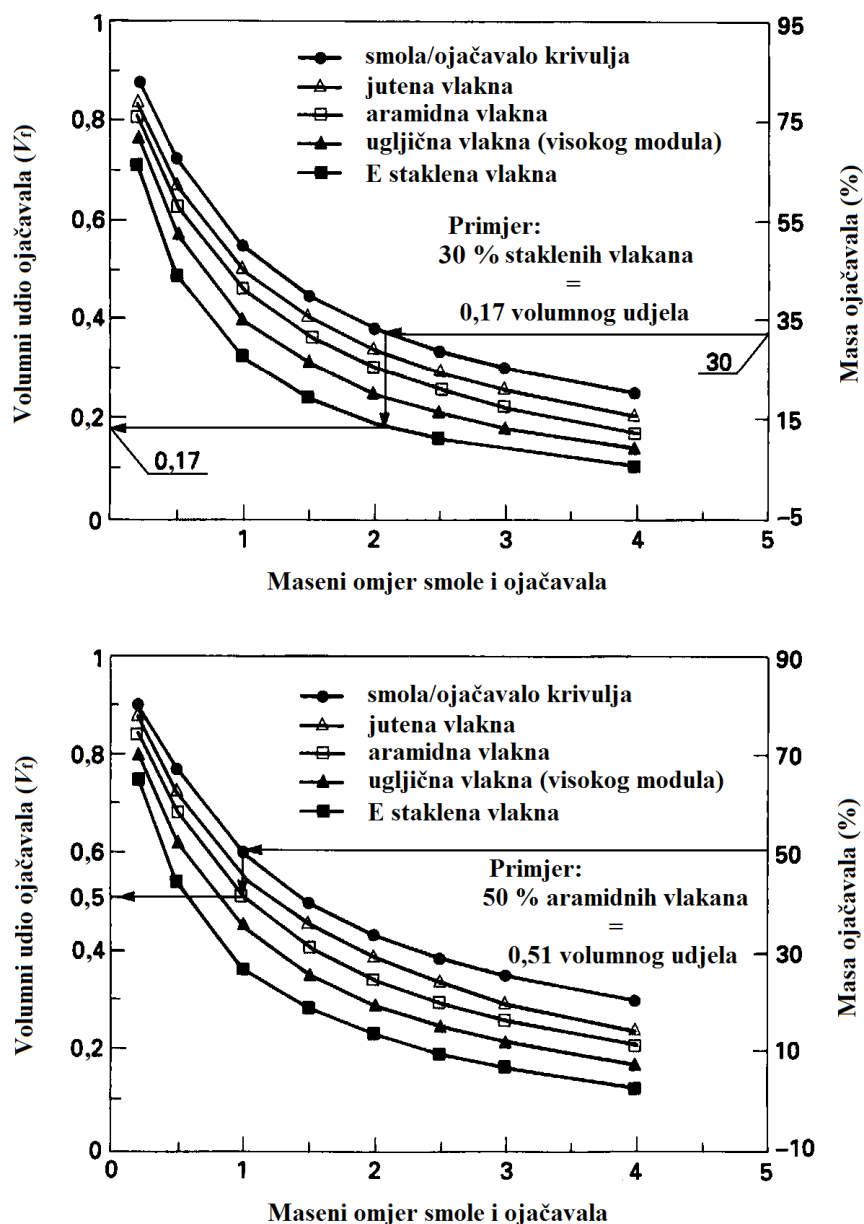
Jednosmjerno orijentirana ojačavala su većinom prošivene tkanine gdje ne dolazi do presijecanja vlakana. U skupinu višesmjerno orijentiranih ojačavala ubrajamo tkanine nastale tkanjem ili pletenjem vlakana te sve vrste mata. [7]

3.2. Svojstva vlaknima ojačanih kompozita

Mehaničko ponašanje kompozitnih materijala nije određeno samim vlaknima, nego sinergijom između vlakana i matrice. [1] Čestice na mikronskoj skali obično osiguravaju bolju toplinsku stabilnost i postojanost, dok se čestice na nano skali kao i viskeri, kratka ili kontinuirana vlakna dodaju kako bi se pojačala fizikalna i mehanička svojstva matrice. Ojačavala od kontinuiranih vlakana obično osiguravaju najveće poboljšanje mehaničkih svojstava kao što su krutost i čvrstoća, a u kompozit se dodaju u različitim oblicima. [7]

Iako svojstva ojačavala imaju značajan utjecaj na konačna svojstva kompozita, kvaliteta polaznog materijala i postupka obrade odabranog za proizvodnju kompozita može utjecati na konačna svojstva i značajke kompozita. Cilj u proizvodnji kompozita je proizvoditi komponente sa željenim svojstvima koja spajaju najbolja svojstva ojačavala i smole, dok prikrivaju ili smanjuju njihove nedostatke. Stoga se u proizvodnji kompozita svojstva materijala određuju za vrijeme proizvodnje tvorevine. To vrijedi i za kompozite s kratkim vlaknima kao i za kompozite s kontinuiranim vlaknima. Za sustave s kratkim vlaknima, predobrada (e. *processing history*), svojstva i tok materijala tijekom postupaka proizvodnje mogu utjecati na konačnu orijentaciju vlakana i gustoću distribucije što može rezultirati nehomogenim svojstvima konačnog kompozita. Za sustave s kontinuiranim vlaknima, izazov prilikom izrade kompozita je popuniti sve praznine između vlakana smolom, tako da postoji dobra povezanost između matrice i vlakana. [7] Nažalost kompoziti gotovo uvijek sadrže šupljine raznih oblika i veličina koje nastaju zbog neuklopljenih mjehurića zraka u viskoznoj fazi smole tijekom izrade ili su posljedica lošeg natapanja vlakna. Te šupljine smanjuju svojstva kompozita uzrokujući delaminaciju, odnosno iniciraju pukotine kod opterećenja. [8]

Također udio ojačavala prisutnih u kompozitu ima veliki utjecaj na svojstva čvrstoće i krutosti kompozita, kao i tip i orijentacija vlakana. Sadržaj vlakana obično se izražava u omjeru mase, volumena ili omjeru smole i vlakana. Tipični omjeri smole i vlakana prikazani su na slici 3.1. [1]



Slika 3.1. Odnos smole i vlakana [1]

Sa slike 3.1 može se iščitati da za kompozit s poliesterskom matricom i 30 % mase ojačavala od E staklenih vlakana čini 0,17 volumnog udjela, a za kompozit s poliesterskom smolom i 50 % mase ojačavala od aramidnih vlakana čini 0,51 volumnog udjela. [4]

Osim što je u matricu ugrađeno ojačavalo, matrice također štite pojedinačna vlakna od površinskog oštećivanja do kojeg može doći mehaničkom abrazijom ili kemijskom reakcijom od strane okolnog medija, a što bi kao posljedicu imalo odvajanje matrice od vlakana pri nižim rasteznim naprezanjima. U konačnici to bi dovelo do propagiranja krhkog loma od vlakna do vlakna odnosno rezultiralo lomom. [4] U slučaju kada zbog naprezanja dođe do pucanja pojedinog vlakna unutar kompozita, to se naprezanje prenosi preostalim vlaknima. Slomljena vlakna ugrađena u matricu zadržavaju mehaničku funkciju dok njihova duljina ne padne ispod kritične dužine vlakana za prijenos opterećenje matricom. [1] Drugim riječima, matrica služi kao prepreka napredovanju pukotina odnosno onemogućuje da pukotine od prekinutih vlakana napreduju kroz cijeli kompozit. Iako neka pojedinačna vlakna puknu, do loma kompletnog kompozita neće doći dok god veći broj okolnih vlakana, koja su jednom pukla, oblikuju skupinu (grozd) kritične veličine. [4]

Osim duktilnosti i žilavosti matrica također treba biti čvrsta tako da doprinosi sveukupnoj čvrstoći kompozita. Čvrstoća kompozita u velikoj mjeri ovisi o adhezijskim vezama između vlakana i matrice, te je bitno da su te veze dostatne da umanje izvlačenje vlakana. Između ostalog, čvrstoća povezivanja važna je pretpostavka pri izboru kombinacija matrice i vlakna. [3]

Temperatura kojoj će kompozitni materijali biti izložen pri uporabi često određuje vrstu kompozita koji se upotrebljava u određenoj primjeni. Kompoziti s polimernom matricom upotrebljavaju se u primjenama koje uključuju relativno niske temperature od 80 °C – 200 °C. [3] Njihova svojstva mogu se poboljšati s naknadnim umreživanjem, ali kako se temperatura povisuje i približava temperaturi postojanosti oblika (e. *heat deflection temperature*) smole, tako se svojstva polimernog kompozita dramatično smanjuju. [1]

Prednosti kompozitnih polimernih materijala u odnosu na druge konstrukcijske materijale su: povoljne vrijednosti specifične čvrstoće i specifične krutosti, mala gustoća, dobra kemijska postojanost, dobro prigušenje vibracija, relativno laka i ne suviše skupa proizvodnja konstrukcijskih dijelova. [8] Stoga su polimerni kompoziti zastupljeni u raznim granama industrijske proizvodnje kao što su: automobilska industrija, brodogradnja, građevinarstvo, elektrotehnika i elektronika, zrakoplovstvo, vojna industrija, te u svemirskom programu gdje vrlo uspješno zamjenjuju klasične konstrukcijske materijale. [9] Naravno postoje i nedostaci, a to su: krutost, osjetljivost na raslojavanje i mrvljenje, mogućnost širenja pukotina duž

vlakana, stvaranje napetosti u materijalu zbog skupljanja uslijed umreživanja matrice te anizotropnost svojstava. [8]

U nastavku su navedeni materijali koji se upotrebljavaju za polimerne matrice i njihova svojstva, te materijali koji se upotrebljavaju za izradu vlakana, njihova svojstva i primjeri njihove primjene za izradu različitih vrsta tkanina za ojačavanje.

3.3. Materijali za izradu matrica kompozita

Vlaknima ojačani polimerni kompoziti sastoje se od polimerne smole kao matrice s vlaknima kao komponentom za ojačavanje. Pojam „smola“ u ovom se kontekstu upotrebljava za obilježavanje polimera tj. tvari visoke molekulne mase koju treba ojačati. [4] Spajanjem vlakana matricom stvara se materijal gdje čvrsta i kruta vlakna nose najviši dio naprezanja dok matrica raspodjeljuje vanjsko opterećenje na sva vlakna, kao i što daje zaštitu i sprječava savijanje vlakana pod tlačnim silama. Najkritičnija zona postupka prijenosa opterećenja je naravno kontaktna površina (e. *interface*) vlakna i smole. Ta površina je često slabo definirana osobito u slučaju staklenih vlakana gdje se tijekom postupka proizvodnje vlakna na vlakno nanosi vodeni premaz. [1] Matrica također ima i neke dodatne uloge kao što su osiguravanje fizičkog oblika kompozita, povezivanje i zaštita vlakna od agresivnih (kemijskih) okolina ili mehaničkih oštećenja, održavanje željene orijentacije i razmaka vlakana u kompozitu, te prenošenje i raspoređivanje naprezanja između vlakana i između slojeva na područjima diskontinuiteta u opterećenju ili geometriji. [7]

3.3.1. Nezasićene poliesterske smole

3.3.1.1. Struktura poliesterske smole [1]

Najčešće upotrebljavane smole za proizvodnju vlaknima ojačanih polimera su nezasićene poliesterske smole, koje obično jednostavno nazivamo poliesteri. One su sirupaste konzistencije, a sastoje se od polimernih lanaca otopljenih u reaktivnom organskom otapalu (monomer). Dodavanje pogodnog katalizatora i ubrzivača uzrokuje kemijsku reakciju smole, te ona u hladnom stanju i bez dodatnog tlaka formira čvrstu trodimenzionalnu strukturu od poliesterskih polimernih lanaca povezanih s reaktivnim polimernim lancima otapala. Stiren je reaktivno organsko otapalo koje snižava viskoznost smole i olakšava primjenu a reaktivni polimerni lanci otapala su polistiren.

3.3.1.2. Umreživanje poliesterske smole [1]

Poliesterske smole se umrežuju reakcijom kopolimerizacije slobodnih radikala, koja se može inicirati pri sobnoj temperaturi s organskim peroksidima, toplinom ili zračenjem. Sposobnost poliesterske smole da se hladno umreži čini je prikladnijom od bilo kojeg drugog sustava smola za proizvodnju vrlo velikih konstrukcija.

Sustav katalizatora sastoji se od organskih peroksida (inicijatora) koji se aktiviraju pomoću ubrzivača. Ubrzivač potiče razgradnju peroksida da bi se pokrenula reakcija umreživanja. Umreživanje poliesterske smole počinje čim se doda inicijator. Brzina reakcije ovisi o temperaturi, smoli i reaktivnosti katalizatora. Bez upotrebe akceleratora, topline ili zračenja, katalizirana smola imat će radni vijek u trajanju od nekoliko sati ili čak dana. Stoga je neophodno imati dovoljne količine inicijatora i ubrzivača kako bi se osiguralo odgovarajuće umreživanje. Ne postoji način kojim bi se popravilo nepotpuno inicijalno umreživanje, čak ni s dodatnim visokotemperaturnim naknadnim umreživanjem (e. *post-cure*). Umreživanje se odvija u nekoliko faza:

- Indukcijsko razdoblje, u kojem se ništa ne događa. Međutim, formiraju se slobodni radikali koji odmah reagiraju s inhibitorom, koji se upotrebljavaju za dobivanje smole odgovarajućeg vijeka trajanja.
- Geliranje gdje se počinje oblikovati umrežena struktura.
- Povišenje temperature uslijed egzotermnog procesa.
- Završno umreživanje koje može trajati danima ili tjednima.

3.3.1.3. Svojstva poliesterske smole [8]

Poliesterske smole se odlikuju nizom dobrih svojstava koja su im u kratkom vremenu omogućila brzi razvoj i široku primjenu u proizvodnoj industriji. Alati i kalupi koji se primjenjuju su jednostavni i razmjerno jeftini, kalupi se mogu izraditi od gipsa, metala, drva, te od epoksidne i poliesterske smole. Mogu se prerađivati pri sobnoj temperaturi, a gotovi proizvodi su postojani i pri visokim temperaturama. Daju veliku slobodu pri odabiru oblika gotovog proizvoda, te su dimenzionalno stabilni.

Poliesterske smole imaju sposobnost brzog prelaženja iz kapljevito u kruto stanje bez velikog razvijanja hlapljivih nusprodukata što omogućava kratke proizvodne cikluse te preradu pod niskim tlakom ili bez primjene tlaka. Tvrdća i elastičnost poliestera može

varirati u vrlo širokim granicama, te su moguće varijacije od krutih do savitljivih proizvoda. Dodavanje jeftinih punila ima minimalan utjecaj na mehanička i ostala svojstva gotovih proizvoda. Posjeduju odlična optička svojstva, mogu se lagano bojati organskim i anorganskim bojama (pigmentima), a uz opreznu preradu i izbor smole mogu se dobiti vrlo prozirne tvorevine. Slabo provode toplinu, dok se neki specijalni poliesteri odlikuju odličnom toplinskom stabilnošću. Primjenjuju se kao antikorozivni materijali zbog postojanosti prema atmosferilijama i kemijske postojanosti. Posjeduju dobra električna i dielektrična svojstva pa su zastupljeni u elektronici i elektrotehnici. Specijalni tipovi poliestera su samogasivi, što im dodatno proširuje područje primjene.

3.3.2. Vinil-esterske smole

3.3.2.1. Struktura vinil-esterske smole [1]

Vinil-esterske smole najčešće se smatraju produžetkom raspona poliesterskih smola, jer se isporučuju kao reaktivni monomer, obično stiren, i umrežuju putem reakcije slobodnih radikala koji se iniciraju na isti način kao i mehanizam umreživanja poliesterskih smola. Također, vinilne smole sadrže manje esterskih veza od konvencionalnih poliestera i stoga imaju poboljšanu kemijsku postojanost, dok dvostruke veze rezultiraju tvrdom, otpornom strukturom smole.

3.3.2.2. Umreživanje vinil-esterske smole [1]

Vinil-esterske smole se obrađuju na sličan način kao poliesterske smole, primjenom peroksidnih katalizatora i kobalnog ubrzivača, često uz dodavanje dimetilanilina. Također se mogu primijeniti i sustavi s postupkom toplog umreživanja koji se temelje na benzoil peroksidu.

3.3.2.3. Svojstva vinil-esterske smole

Vinil-esterske smole imaju slična svojstva nekolicini poliesterskih smola, ali kao i kod poliesterskih smola, najviša postojanost na povišenu temperaturu može se postići samo kada se smola naknadno umreži na visokoj temperaturi. Stupanj naknadnog umreživanja na povišenim temperaturama bitan je ako se treba postići najveća učinkovitost i optimalna kemijska postojanost na vlagu i široki spektar kiselina, lužina i otapala. [1] Vinil esterske smole osiguravaju visoku postojanost kao i visoku toplinsku postojanost oblika zbog čega se često upotrebljavaju kao završni premaz, te kao različiti dodaci čime se poboljšava postojanost na djelovanje UV zraka i vatrootpornost. [8]

3.3.3. Epoksidne smole

3.3.3.1. Struktura epoksidne smole [1]

Epoksidne smole se općenito proizvode reakcijom epiklorhidrina s bisfenolom A. To su viskozne kapljevine u termoplastičnom stanju i značajno se razlikuju od poliesterske i vinil esterske smole jer ne sadrže hlapljive monomerne komponente. Različite smole nastaju promjenom omjera epiklorhidrina i bisfenola, odnosno kako se udio epiklorhidrina smanjuje, tako se povećava molekulska masa smole.

Kao posljedica njihove velike viskoznosti, epoksidne smole često se prerađuju pri povišenim temperaturama (50 –100 °C) ili se otapaju u inertnom otapalu kako bi se smanjila viskoznost na razinu na kojoj se može upotrebiti za preradu pri sobnoj temperaturi. Međutim to može dovesti do problema s niskotemperaturnim umreživanjem, budući da bi smola mogla umrežiti prije no što otapalo ispari. Glicidil esterske smole imaju idealnu viskoznosti i reaktivnost prikladnu za primjenu kod podtlačne impregnacije, laminiranja i lijevanja.

3.3.3.2. Umreživanje epoksidne smole [1]

Epoksidne smole se umrežuju pomoću sredstva za umreživanje (e. *curing agent*), koja se često nazivaju katalizatori, očvršćivači (e. *hardeners*) ili aktivatori. Premda se pojmovi često primjenjuju neselektivno, postoje razlike među njima. Neka sredstva za umreživanje djeluju putem katalitičkog djelovanja, dok drugi reagiraju sa smolom i apsorbiraju se u lanac smole. Tijekom umreživanja, epoksidne smole mogu proći kroz tri osnovne reakcije:

- Epoksidne skupine se premještaju i oblikuju izravne veze između sebe.
- Aromatske i alifatske hidroksilne skupine reagiraju s epoksidnim skupinama.
- Umreživanje započinje sa sredstvom za umreživanje putem raznih skupina radikala

3.3.3.3. Svojstva epoksidne smole

Vrlo je važno napomenuti potrebu da se epoksidna smola umrežuje pri povišenoj temperaturi kako bi se postigla prihvatljiva razina umreženosti. Iako su dostupne hladno umrežive (e. *cold-cure*) epoksidne smole, smole pokazuju bolja svojstva kada se umreže iznad 40 °C, tj. po mogućnosti na 60 °C. [1] Posjeduju dobra mehanička svojstva, dobru postojanost na agresivne medije, te visoku toplinsku postojanost. Samim time imaju dugotrajnu postojanost na vanjske utjecaje. Osobita adhezivna svojstva dolaze do izražaja u primjeni ovih smola kod izrade laminata. [8] Najveći nedostatak epoksidnih smola je njihova cijena u usporedbi s

poliesterskim smolama. Stoga se prvenstveno primjenjuju kod izrade trupova jako opterećenih jedinica u brodogradnji i avionskoj industriji. [5]

3.3.4. Ostali sustavi duromernih smola [1]

Osim poliesterskih, vinil-esterskih i epoksidnih smola postoje i druge smole koje se primjenjuju za laminiranje i kalupljenje. To uključuje furanske, poliimidne, silikonske, fenolne, melaminske i urea-formaldehidne smole. Od njih najstarija poznata duromerna smola, fenolna, ponovo se vraća u primjenu zbog svojstva male emisije dima (e. *low smoke*) i svojstva usporavanja gorenja.

3.3.4.1. Fenolne (fenol-formaldehid) smole

Fenolne smole se proizvode reakcijom kondenzacije kombinirajući fenol i formaldehid u prisutnosti katalizatora. S gledišta rukovanja, katalizator (kiselina) koji se primjenjuje u umreživanju fenolnih smola glavni je nedostatak njihove primjene. Osim njihove postojanosti na vatru i samogasivosti, fenolne smole nude nekoliko prednosti u odnosu na poliesterske smole koje su krhke, ograničenih boja i teške za obradu. [1] Imaju povišenu postojanost prema utjecaju organskih otapala i kiselina. Pri umreživanju otpuštaju veliku količinu hlapljivih tvari što nepovoljno utječe na mehanička svojstva smole kao matrice. [5]

3.3.4.2. Silikonske smole

Silikonske smole su smole s najvećom postojanosti na povišene temperature koje se primjenjuju u proizvodnji vlaknima ojačanih polimera. One pokazuju dobra mehanička, električna i toplinska svojstva. Silikonske smole se umrežuju zagrijavanjem uz prisutnost katalizatora kao što je kobalt naftenat, cinkoktoat ili amini kao što je trietanolamin. Silikonske smole se često primjenjuju u proizvodnji preprega.

3.3.4.3. Poliimidne smole

Poliimidne smole su jedne od najbolje toplinsko stabilnih organskih smola koje su trenutno poznate. Kalupljenje se vrši pri 300 °C s naknadnim umreživanjem na 400 °C kako bi se postigla potpuna toplinska stabilnost. Jedna od komplikacija primjene tih smola je uklanjanje vode tijekom umreživanja.

3.3.4.4. Furanske smole

Furanske smole primarno se upotrebljavaju za primjene gdje je potrebna kemijska postojanost, jer imaju najbolju kemijsku postojanost u odnosu na bilo koju drugu duromernu

smolu u neoksidirajućim uvjetima. Imaju izvrsnu postojanost na otapala za razliku od mnogih drugih uobičajenih smola koje se primjenjuju u kemijskim postrojenjima. Poput fenolnih smola, furanskim smolama potrebna je kiselina kao katalizator za umreživanje što predstavlja znatan problem prilikom proizvodnje.

3.3.5. Dodaci smolama [1]

Rijetko se osnovne smole isporučuju bez dodavanja čestičnih materijala koji su općenito prisutni radi poboljšanja njihovih performansi. Na primjer:

- ukrasna boja - boja pomoću pigmentnih pasta
- rukovanje - tiksotropna sredstva (staklene mikrosfere)
- zaštita od požara - halogenirani materijal, antimon trioksid, aluminij trihidrat
- svjetlosna stabilizacija - UV apsorberi
- inhibitor za smanjenje isparavanja – sprječava površinsku migraciju materijala
- poboljšani modul materijala.

Naravno, s prednostima često dolaze i nedostaci, a tako je i s dodavanjem punila u smolu gdje je smanjenje fleksibilnosti i prozirnosti gotovo neizbježno. Međutim prednosti često nadilaze nedostatke, te samo ako su jeftinija punila dodana u većim količinama kako bi se smanjili troškovi, postoji potreba za ispitivanjem prednosti u smislu performansi komponenti.

3.3.6. Plastomerne matrice

Postoji sve veći interes za upotrebu plastomera za proizvode ojačane dugim vlaknima zbog njihove odlične žilavosti, elastičnosti i postojanost na koroziju. Polimeri s ravnim lancem, kao što su polikarbonat, polietilen, polipropilen i polistiren, ipak imaju temeljni nedostatak u usporedbi s duromernim smolama. Kod oblikovanja, plastomeri moraju biti ili pri povišenoj temperaturi ili iznad točke taljenja, što znači da su u rastaljenom stanju vrlo viskozni, a u krutom stanju imaju nižu razinu postojanost na povišenu temperaturu i otapala. [1]

Najčešća plastomerna matrica koja se upotrebljava u kompozitnim materijalima je polipropilen (PP). Polipropilen se ojačava uglavnom staklenim vlaknima, te se tako postiže žilav kompozit s relativno visokom toplinskom postojanošću oblika (do 150 °C). Primjenjuju se u automobilske industriji za izradu branika i dijelova unutrašnjosti automobila postupkom injekcijskim prešanjem gdje su duljine vlakana vrlo kratke, često ne dulje od $L_{vl} = 30 \mu m$. [5]

Za visokotemperaturne primjene upotrebljava se poli(fenil-sulfid) (PPS) i poli(eter-eter-keton) (PEEK). PPS se upotrebljava kao zamjena za Al-legure, npr. krila aviona. Masa krila se smanjuje za oko 20 %, čime se snižava potrošnja goriva, poboljšava se otpornost na udarna opterećenja, te se poboljšava postojanost na agresivne medije (gorivo, sredstvo za odleđivanje, itd). PEEK se zbog dobrog ponašanja u slučaju požara i odlične toplinske i kemijske postojanosti primjenjuje u brodskoj, zrakoplovnoj i automobilskoj industriji, te elektroindustriji, izoliranju kabela, za izradu implantanata i ortopedskih pomagala. [5]

Najveće prednosti plastomernih matrica u usporedbi s duromernim su neograničeno dugo skladištenje preprega pri sobnoj temperaturi, pogodnih plastomernih matrica za automatizirane postupke prerade te mogućnost postizanja visoke kompaktnosti kompozita. [5]

3.4. Materijali za izradu ojačavala kompozita

Ojačavala se upotrebljavaju u sustavima smola radi poboljšanja mehaničkih svojstava umrežene smole, a vlakna za ojačavanje pažljivo su odabrana za svaku primjenu kako bi se ostvarila željena svojstva u proizvodu postavljanjem vlakana u smjeru najvišeg naprezanja. [1]

Vrste vlakana koje se najčešće upotrebljavaju u kompozitima s polimernom matricom (e. *polymer matrix composite*, PMC) su: staklena vlakna, aramidna vlakna, grafitna ili ugljična vlakna, te polietilenska vlakna vrlo visoke gustoće. Od ostalih vlakana važno je spomenuti borna, keramička i vlakna biljnog podrijetla. Bez obzira na materijal, vlakna se rijetko izravno primjenjuju bez prethodne pripreme u obliku poluproizvoda. Nakon postupka proizvodnje individualna vlakna se grupiraju u strukove koji se zatim namataju u klupka. Najčešće vrste poluproizvoda su mat, roving i tkanine. [3]

3.4.1. Staklena vlakna

Staklena vlakna su najčešće upotrebljavana ojačavala u polimernim kompozitima s duromernom ili plastomernom matricom gdje su nosilac mehaničkih svojstava kompozita. U ASTM normi definirano je osam različitih vrsta staklenih vlakana. To su A, AR, C, D, E, E-CR, R i S staklena vlakna. U svim slučajevima staklena vlakna sastoje se ponajprije od silicijevog dioksida (SiO_2), a oksidi se dodaju kako bi se poboljšala svojstva koja su potrebna za namjeravanu primjenu. [3] A ili alkalijsko staklo jedno je vrijeme bilo uobičajeni osnovni

materijal za proizvodnju staklenih vlakana. [1] Vlakna od AR stakla pokazuju povećanu postojanost na koroziju uzrokovanu alkalima. C staklo je posebno staklo koje ima povećanu postojanost na koroziju uzrokovanu kiselinama, a zbog svoje postojanosti na kemikalije primjenjuju se u proizvodnji površinskih slojeva. [3] E ili električno staklo, vrlo niskog alkalnog sadržaja, pruža dobra električna i mehanička svojstva te kemijsku postojanost. R i S ili konstrukcijsko staklo su stakla visoke čvrstoće i krutosti, koja se isporučuju u obliku vlakana, a uglavnom se primjenjuju u zrakoplovnoj industriji. [1]

3.4.1.1. Proizvodnja staklenih vlakana [1]

Vlakna se proizvode miješanjem anorganskih materijala kao što su: SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , MgO , itd., odnosno točan kemijski sastav ovisi o primjeni. Materijali se spajaju, reagiraju i tale zajedno u peći za taljenje pri temperaturi oko $1200\text{ }^\circ\text{C}$. Otprilike pri $1600\text{ }^\circ\text{C}$ uklanjaju se otopljeni plinovi i dobiva se homogenost stakla. Kod sustava izravnog taljenja pročišćeno staklo se izravno oblikuje u niti pomoću čahure od platine (e. *platinum bushing*), dok kod postupka mramoriranja rafinirano staklo prelazi u kuglice koje se kale i naknadno tale te oblikuje pomoću čahure od platine.

U oba postupka upotrebljava se električki grijana čahura od platine, koja sadrži između 100 i 800 rupica. Rastaljeno staklo se vuče kroz čahuru u obliku kontinuiranih niti pri brzini od 50 m/s. Pojedinačne niti su prevučene apreturom i drugim aditivima kao što je emulzija prije nego što se od njih napravi struk koji se zatim namata na kolut velikom brzinom. Promjeri niti kreću se od $D_{\text{vl}} = 3 - 14\text{ }\mu\text{m}$ ili više, dok kod E staklenih vlakana obično oko $D_{\text{vl}} = 13\text{ }\mu\text{m}$.

3.4.1.2. Apretiranje staklenih vlakana [1]

Apretura se nanosi na stakleno vlakno neposredno nakon postupka vučenja. Apretura obavlja niz funkcija uključujući nanošenje sredstva za spajanje, zaštitu stakla od abrazije površine i služi kao pomoć kod prerade kako bi se optimizirala učinkovitost vlakana u krajnjoj upotrebi. Tipična apretura nanosi se u obliku emulzije i sastoji se od: sredstva za povezivanje, sredstva za stvaranje filma, maziva i antistatičkog sredstva.

Za poboljšanje svojstava u kompozitima, sredstvo za povezivanje je najvažnija komponenta apretiranja vlakana. Sredstva za spajanje ne samo da poboljšavaju svojstva sustava duromernih smola ojačanih staklenim vlaknima, nego također poboljšava mehanička i električna svojstva mnogih ojačanih plastomernih sustava.

3.4.1.3. Svojstva staklenih vlakana

Staklena vlakna upotrebljavaju se za ojačavanje iz nekoliko razloga. Kada se staklo rastali lako ga se iz rastaljenog stanja izvlači u oblik visokočvrstih vlakana, a budući da su vlakna relativno čvrsta, kada ih se uloži u polimernu matricu, dobiva se kompozit vrlo visoke specifične čvrstoće i modula elastičnosti. Kombiniranjem staklenih vlakana s različitim polimerima postiže se kemijska inertnost i postojanost na starenje što daje kompozite korisne za primjenu u različitim korozivnim sredstvima. Zbog toga što se relativno jednostavno i jeftino prerađuju u gotove proizvode proizvodnja kompozita sa staklenim vlaknima je ekonomična. [4]

Najčešće primijenjena staklena vlakna u kompozitima s polimernom matricom su E i S staklena vlakna. Vlakna od E stakla imaju vrlo dobra svojstva i relativno su jeftina tako da se E staklena vlakna primjenjuju i u konstrukcijskim kompozitima umjesto S staklenih vlakana. Tipična mehanička svojstva navedena su u tablici 3.1. [3]

Tablica 3.1. Mehanička svojstva staklenih vlakana [3]

Svojstvo	Gustoća, ρ [kg/m ³]	Youngov modul, E [kN/mm ²]	Rastezna čvrstoća, R_m [N/mm ²]	Toplinska rastezljivost, α [1/K]
E stakleno vl.	2600	72	3450	5,0
S stakleno vl.	2500	87	4310	5,6

3.4.1.4. Primjena staklenih vlakana [4]

Poznati su mnogi primjeri primjene staklenim vlaknima ojačanih polimernih kompozita kao što su kabine vozila i trupovi brodova, cijevi, spremnici, te industrijski podovi. Industrija transporta primjenjuje sve veće količine staklenim vlaknima ojačanih polimernih materijala u težnji da smanji masu vozila i poveća djelotvornost transporta kapljevina.

3.4.2. Grafitna i ugljična vlakna

Ugljična vlakna su najskuplja ojačavala od uobičajenih vlakana. Najčešće se primjenjuju u zrakoplovnoj industriji gdje su troškovi materijala manje važni, a kombinacija izvrsnih svojstava zajedno s malom masom čine ugljična vlakna nezamjenjivim ojačanjem. [1]

Izrazi „grafit“ i „ugljik“ često se upotrebljavaju kao sinonimi unutar kompozitnih zajednica. Primjena izraza „ugljična vlakna“ može djelovati zbunjujuće budući da je ugljik jedan od elemenata čiji kristalni oblik ugljika u ambijentalnim uvjetima nazivamo grafit. Ugljična

vlakna nisu u cijelosti kristalna, već se sastoje od grafitnih i nekristalnih područja. Nekristalna područja ne sadrže trodimenzionalni raspored heksagonalne kristalne strukture ugljika koja je svojstvena za grafit. [4] Elementarni sadržaj ugljika bilo koje vrste vlakana je iznad 90 %, a najkruća i najjača vlakna imaju elementarni sadržaj ugljika koji se približava 100 %. Stoga se nastoji normirati ove pojmove definiranjem grafitnih vlakana kao one koje imaju sadržaj ugljika iznad 95 %, Youngov modul 345 GPa, toplinski su obrađena pri temperaturama iznad 1700 °C te su istegnuta tijekom toplinske obrade radi postizanja visokog stupnja kristalne orijentacije. Vlakna koja ne zadovoljavaju sve navedene uvjete nazivaju se ugljičnim vlaknima prema ovoj normi. Međutim, kao što je gore navedeno, u praksi ova definicija nije široko primijenjena a pojmovi "grafit" i "ugljik" često se upotrebljavaju kao istoznačnice. [3]

3.4.2.1. *Proizvodnja grafitnih i ugljičnih vlakana*

Postupci proizvodnje i grafitnih i ugljičnih vlakana relativno su kompleksni, jer nastaju toplinskim raspadom organskog (tj. polimernog) vlakna ili „prekursora“ pri visokom tlaku i temperaturama. Tri najčešća prekursora su poliakrilonitril (PAN), *Rayon* te katran.

Poliakrilonitril je sintetski polimer s ponavljajućom jedinicom $[C_3H_3N]_n$, *Rayon* su polusintetska vlakna proizvedena iz prirodne polimerne celuloze s ponavljajućom jedinicom $[C_6H_{10}O_5]_n$, a katran je visoko viskozni kruti polimer koji se može dobiti ili iz naftnih derivata, u tom se slučaju ponekad nazivaju naftni katran ili smola ili iz biljaka.

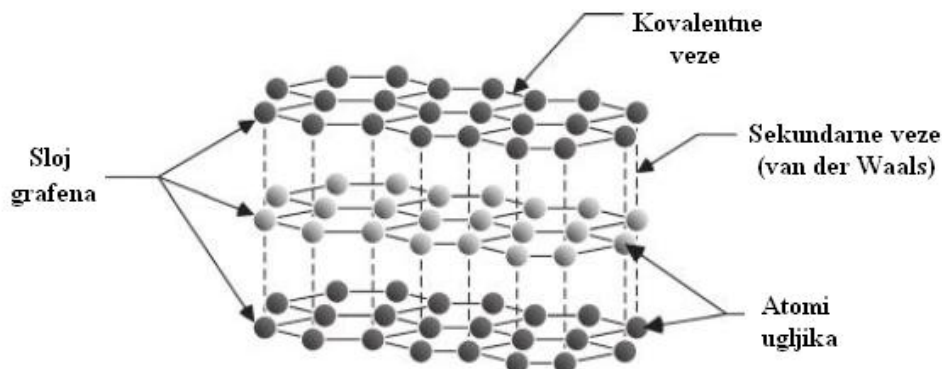
Pojedinosti o specifičnim koracima tijekom izrade određenog ugljičnog ili grafitnog vlakna su zaštićeni i mogu se opisati samo općenito. U svim postupcima proizvodnje ugljičnih vlakana, prekursor se vuče u nit, a zatim se oksidira pri temperaturama od 230 °C do 260 °C da bi se formirala mreža produženog ugljika. Prekursor se zatim podvrgava karbonizacijskom tretmanu pri temperaturnom rasponu od 700 °C do 1000 °C u inertoj atmosferi, tijekom kojeg se neugljikovi atomi otpuštaju. Konačno, tijekom procesa grafitizacije vlakna se podvrgavaju kombinaciji visoke temperature u rasponu od 1500 °C do 3000 °C i rasteznom istezanju. [3] Pri temperaturi do 2600 °C postiže se visoka čvrstoća vlakna, a povišenje temperature na 3000 °C dolazi do pretvorbe vlakana visoke čvrstoće u grafitna vlakna visokog modula. Uobičajeno promjeri vlakana su od 4 do 10 μm, a dostupna su kao kontinuirana i rezana. [1]

Postupci proizvodnje razlikuju se ovisno o polaznom materijalu, o čemu također ovise rezultirajuća svojstva materijala. Vlakna proizvedena iz PANa imaju veliku rasteznu čvrstoću

dok nasuprot tome, vlakna proizvedena iz katranskog prekursora imaju veliku krutost. Jedan od pristupa klasifikaciji ugljičnih vlakana je onaj prema rasteznom modulu elastičnosti, na temelju kojeg se razlikuju četiri tipa ugljičnih vlakana: tip sa standardnim, tip sa srednjim, tip s visokim i tip s ultra-visokim rasteznim modulom elastičnosti. [3]

3.4.2.2. Svojstva grafitnih i ugljičnih vlakana

Postupkom obrade prekursora nastaje kristalna struktura na bazi ugljika koja se zove "grafit".



Slika 3.2. Kristalna struktura grafita [3]

U grafitnoj kristalnoj struktura atomi ugljika raspoređeni su u paralelnim ravninama ili listovima nazvanim grafenom, kao što je prikazano na slici 3.2. Visoka čvrstoća i krutost vlakana postižu se tako da se grafenske ravnine poravnavaju s osnim smjerom vlakana. Iako su atomi ugljika unutar grafenskih ravnina kovalentno vezani, susjedne grafenske ravnine povezane su s relativno slabijim van der Waalsovima silama, stoga su ugljična vlakna vrlo anizotropna, budući da slabije sile djeluju poprečno na osi vlakana. [3]

Ugljična vlakna imaju, od svih vlaknastih materijala za ojačanje, najviši specifični modul i čvrstoću te odličnu otpornost na puzanje i zamor materijala kao i postojanost na vlaga i niz otapala, kiselina i lužina. [4] Obično se površinski obrađuju kako bi se poboljšala veza između vlakana i matrice, a apretiranje smolom također sprječava oštećenja tijekom rukovanja. [1] Mehanička i fizička svojstva tipična za vlakna standardnog, srednjeg i visokog modula navedena su u tablici 3.2. [3]

Tablica 3.2. Mehanička svojstva ugljičnih vlakana [3]

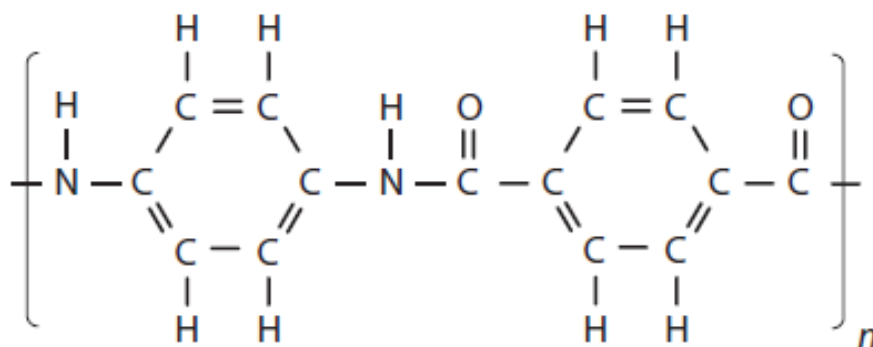
Svojstvo	Gustoća, ρ [kg/m ³]	Youngov modul, E [kN/mm ²]	Rastezna čvrstoća, R_m [N/mm ²]	Toplinska rastezljivost, α [1/K]
vlakna standardnog modula	1,8	230	3450	- 0,4
vlakna srednjeg modula	1,9	370	2480	- 0,5
vlakna visokog modula	2,2	900	3800	- 0,5

3.4.2.3. Primjena ugljičnih vlakana [4]

Ugljičnim vlaknima ojačani polimerni kompoziti u sadašnje vrijeme primjenjuju se za sportsku i rekreacijsku opremu (golf štapovi, glazbala, ...), namotana kućišta raketnih motora, spremnike pod tlakom, konstrukcijske dijelove vojnih i komercijalnih letjelica (npr. dijelovi krila, trupa, stabilizatora i komponenti za upravljanje), u automobilskoj industriji te sve češće u brodogradnji.

3.4.3. Aramidna vlakna

Aramid je generički naziv za klasu sintetskih organskih polimernih vlakana također poznatih kao aromatska poliamidna vlakna. Aramidna vlakna su visokočvrsti i visokomodulni materijali koji su u primjenu uvedeni ranih 1970-ih zbog izuzetnog omjera čvrstoće i gustoće koja je iznad one kod metala. [4] Aramidna vlakna koja proizvodi tvrtka *DuPont Corp.* i koja se prodaju pod trgovačkim imenom *Kevlar*™ vjerojatno su najpoznatija aramidna vlakna. Ova vlakna temelje se na poli(para-fenilentereftalamid) (PPTA), koji je član aramidnih polimera. Osnovna jedinica koja se ponavlja prikazana je na slici 3.3. [3]

**Slika 3.3. Osnovna ponavljajuća jedinica [3]**

3.4.3.1. *Proizvodnja aramidnih vlakana*

Postoji malo dostupnih detalja o postupku proizvodnje aramidnog vlakna, no početni patent tvrdi da se poli-parabenzamidna vlakna mogu proizvesti postupkom pređenja iz kapljevite smjese otapalima. Vlakna se proizvode ekstrudiranjem i postupkom pređenja, tako da se polimer nalazi u prikladnom otapalu između $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ prije ekstrudiranja kroz cilindar vrućih stijenki od $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, pri čemu otapalo isparava. [1] Zatim se vlakno isteže i vuče što rezultira poravnavanjem okosnice polimernog molekularnog lanca s osi vlakana. Iako kovalentna veza (tj. umreživanje) ne postoji između izduženih polimernih lanaca, jaka sekundarna veza nastaje između susjednih atoma vodika (H) i kisika (O). Dobivena vlakna su stoga vrlo anizotropna, jer se u osnom smjeru vlakana formiraju jake kovalentne veze, dok su relativno slabije vodikove veze oblikovane u smjerovima poprečnim na osi vlakana. To jest, aramidna vlakna imaju vrlo veliku rasteznu čvrstoću i krutost u osnom smjeru vlakna, ali relativno nisku rasteznu čvrstoću i krutost u poprečnom smjeru. [3]

3.4.3.2. *Svojstva aramidnih vlakana*

Aramidna vlakna su više od pet puta čvršća od čelika na osnovi mase materijala, s izvrsnom toplinskom i dimenzijskom stabilnošću, te odličnom postojanošću na trošenje i dobrom postojanošću na temperaturu. Za razliku od ugljičnih i staklenih vlakna koja su gotovo potpuno krhka i lome se bez smanjenja poprečnog presjeka, aramidna vlakna pucaju na duktilni način, a prijelom uključuje fibrilaciju vlakana. [1] Premda mehanički gledano aramidna vlakna imaju višu uzdužnu rasteznu čvrstoću i rastezni modul elastičnosti od onih ostalih vlaknastih materijala, relativno su slaba i pucaju pri savijanju zbog male pritiske čvrstoće. [4] Stoga se u kombinaciji s drugim vlaknima, u obliku hibridnih tkanina, osigurava prihvatljiv kompromis iskorištavanja jedinstvenih svojstava aramidnih vlakana. [1]

Osim toga, ovi materijali poznati su po svojoj krutosti i žilavosti, udarnoj žilavosti, otpornosti na puzanje te otpornosti zamoru materijala. Bez obzira na to što su aramidi plastomeri, oni su otporni zapaljenju te stabilni pri relativno visokim temperaturama. Raspon temperatura kod kojih zadržavaju visoka mehanička svojstva kreće se od $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kemijski gledano aramidna vlakna podložna su degradaciji s jakim kiselinama i lužinama, ali su relativno inertna prema drugim otopinama i kemikalijama. [4] Premda na tržištu postoji više vrsta aramidnih vlakna u tablici 3.3 izdvojena su neka mehanička svojstva materijala *Kevlar 29* i *Kevlar 49*. [3]

Tablica 3.3. Mehanička svojstva aramidnih vlakana [3]

Svojstvo	Gustoća, ρ [kg/m ³]	Youngov modul, E [kN/mm ²]	Rastezna čvrstoća, R_m [N/mm ²]	Toplinska rastezljivost, α [1/K]
<i>Kevlar 29</i>	1,44	70	2920	- 3,9
<i>Kevlar 49</i>	1,44	112	3000	- 4,9

3.4.3.3. Primjena aramidnih vlakana [4]

Aramidna vlakna najčešće se upotrebljavaju kod kompozita s polimernom matricom, a budući da su vlakna relativno fleksibilna te ponešto duktilna, mogu se prerađivati većinom uobičajenih postupaka prerade tekstila. Tipična primjena aramidnih kompozita je u zračnoj i svemirskoj industriji za izradu projektila, vojnoj industriji za izradu neprobojnih prsluka, industriji sportske opreme, ali i građevinarskoj za tlačne posude i automobilske industriji kao zamjena azbesta kod automobilske kočnice i spojnici.

3.4.4. Hibridna vlakna

Relativno novija vrsta vlaknima ojačanih kompozita su tzv. hibridni kompoziti koji se dobivaju uporabom dviju ili više različitih vrsta vlakana u jedinstvenoj matrici. Velika prednost ovih kompozita je znatno bolja kombinacija svojstava, nego što je to kod kompozita ojačanih samo jednom vrstom vlakana. Postoje razne kombinacije vlakana i matrica, ali ipak najčešće se primjenjuju ugljična i staklena vlakna u polimernoj matrici. Ugljična vlakna imaju relativno visoku čvrstoću i krutost. Visoka cijena često je faktor koji ograničava njihovu širu primjenu. Nasuprot ugljičnim vlaknima nalaze se staklena vlakna koja imaju lošija mehanička svojstva, ali im je cijena znatno niža. Kombinacijom spomenutih vlakana dobiva se kompozit više čvrstoće i žilavosti, te relativno niže cijene u usporedbi sa samo staklenim ili ugljičnim vlaknima ojačanim kompozitima. [4] Također poznata hibridna vlakna koja se još primjenjuju su kombinacija ugljičnih i aramidnih vlakana. Visoka čvrstoća i omjer krutosti prema masi ugljičnih i aramidnih vlakana čini ih osobito atraktivnim za proizvodnju laganih konstrukcijskih komponenti. [1]

Postoji vrlo velik broj načina slaganja vlakana u matrici što za posljedicu ima i različita svojstva kompozita. Tako, na primjer, vlakna mogu biti usmjerena u jednom smjeru ili orijentirana u različitim smjerovima, laminati se mogu slagati od različitih slojeva pri čemu je svaki sloj sastavljen od drugog tipa ojačavala. Kada se ovakav kompozit optereti na rastezanje lom se ne pojavljuje iznenada. Tipična primjena hibridnih kompozita su razni dijelovi

konstrukcija primjenljivih u kopnenom, zračnom i pomorskom prometu, sportskim rekviziti te razna ortopedska pomagala. [4]

3.4.5. Polietilenska vlaknina [3]

Tijekom 1980-ih organizacija *Allied Signal Technologies* razvila je polietilenska vlakna visoke čvrstoće i visokog modula pod nazivom *Spectra*. *Spectra* se temelji na polietilenu vrlo visoke molekularne mase. Ima specifičnu gravitaciju $SG = 0,97$, što znači da je to jedino dostupno vlakno koje je lakše od vode. *Spectra* je dostupna u tri kategorije, *Spectra 900*, *Spectra 1000* i *Spectra 2000*, a svaka klasa ima nekoliko stupnjeva. Nominalna svojstva navedena su u tablici 3.4.

Tablica 3.4. Mehanička svojstva polietilenskih vlakana [3]

Svojstvo	Gustoća, ρ [kg/m ³]	Youngov modul, E [kN/mm ²]	Rastezna čvrstoća, R_m [N/mm ²]	Toplinska rastezljivost, α [1/K]
<i>Spectra 900</i>	0,97	70	2600	> 70
<i>Spectra 1000</i>	0,97	105	3200	> 70
<i>Spectra 2000</i>	0,97	115	3400	> 70

Visoka specifična čvrstoća vlakana čini ih posebno atraktivnim za primjenu kod rasteznih opterećenja. Temperatura staklastog prijelaza polietilena je u rasponu od -20 °C do 0 °C stoga je vlakno u gumastom stanju pri sobnoj temperaturi i pokazuje viskoelastičnost. Ova značajka pruža izvanrednu otpornost na udar i žilavost, ali može dovesti do neželjenih učinaka puzanja pod dugotrajnim opterećenjem. Temperatura taljenja vlakna je oko 150 °C stoga je upotreba polietilenskih vlakana ograničena na relativno niske temperature.

3.4.6. Borna vlakna [5]

Ugljikova vlakna ponekad se prevlače slojem bora kako bi se poboljšala ukupna svojstva vlakna. Nedostatak bornih vlakana je visoka cijena koja ograničava upotrebu tih vlakana, pa se najčešće primjenjuju samo za zrakoplovne konstrukcije s velikim toplinskim opterećenjima i za specijalizirane sportske proizvode. Hibridni kompozit s bornim i ugljikovim vlaknima u epoksidnoj matrici ima bolja mehanička svojstva nego bilo koje vlakno pojedinačno. Prednosti bornih vlakana su dobra svojstva s obzirom na pritisno opterećenje, torziju i druga kombinirana opterećenja. Poteškoće se javljaju pri obradi zbog visoke tvrdoće tih vlakana.

3.4.7. Keramička vlakna [8]

Keramička vlakna su anorganskog porijekla. Proizvode se od različitih vrsta keramičkih materijala, najčešće aluminijevog oksida i silicijevog karbida. Uglavnom su kao ojačanja zanimljiva zbog visoke toplinske postojanosti i postojanosti na djelovanje vlage, te su primjerena za kompozite koji su podvrgnuti ekstremnim opterećenjima. Keramička vlakna se najčešće upotrebljavaju s epoksidnim smolama. Primjenjuju se za proizvodnju industrijske opreme koja je podvrgnuta teškim uvjetima, pretežno u kemijskoj industriji. Najčešće se upotrebljavaju u obliku viskera u izradi konstrukcija namijenjenih ekstremnim uvjetima rada.

3.4.8. Vlakna biljnog porijekla

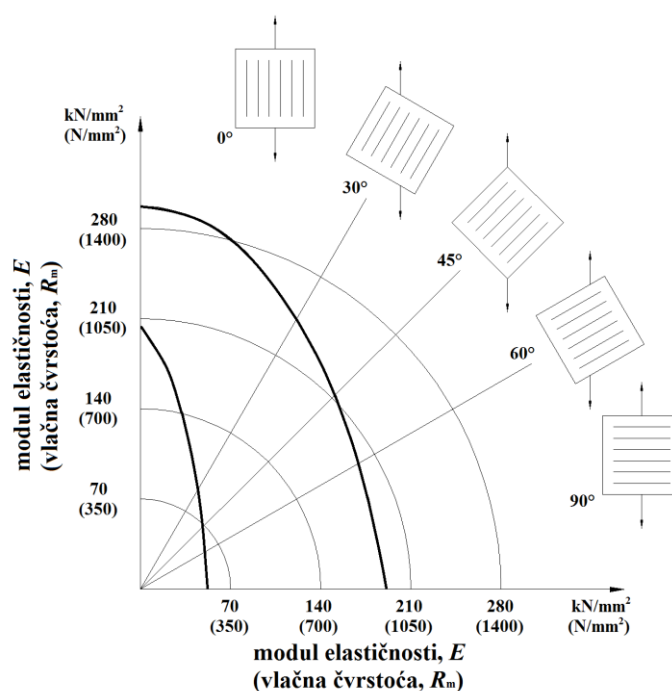
Briga za okoliš u kombinaciji s niskom cijenom pobudila je interes za drvena i biljna vlakna kao zamjenu za ojačavala od staklenih vlakana u plastomernim kompozitima. Prednosti su im manja gustoća i niža cijena, te lakše recikliranje premda u usporedbi sa staklenim vlaknima, postiže se manja proizvodnost i ostvaruje slabija mehanička svojstva kao i postojanost na vlagu i okolišne uvjete. Prirodna vlakna su sklona razgradnji pri temperaturama prerade većine plastomera što ograničava broj materijala koji mogu poslužiti kao matrice. Najčešće se rabe drvna vlakna (bor, jasen, hrast), vlakna agave, sisala, konoplje i jute. [9]

U tablici 3.5 navedena su svojstva kontinuiranih i jednosmjernih staklenih, ugljičnih i aramidnih vlaknima ojačanih epoksidnih kompozita. U svim slučajevima volumni udio vlakana iznosi 0,6. Podaci također omogućuju uspoređivanje mehaničkih svojstava ova tri materijala u uzdužnom i poprečnom smjeru sa svojstvima materijala samih vlakana. [4]

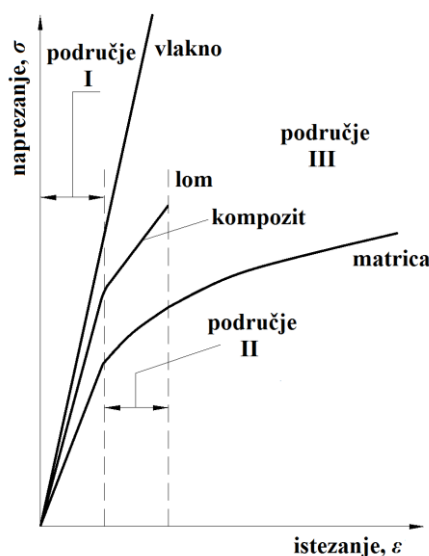
Tablica 3.5. Svojstva kontinuiranih jednosmjernih vlaknima ojačanih kompozita [4]

Svojstvo	Staklo (E-staklo)	Ugljik (visokočvrsti)	Aramid (Kevlar 49)
Gustoća, ρ [kg/m ³]	2100	1600	1400
Rastezni modul elastičnosti, E_r [kN/mm ²]			
Uzdužno	45	145	76
Poprečno	12	10	5,5
Rastezna čvrstoća, R_m [N/mm ²]			
Uzdužno	1020	1240	1380
Poprečno	40	41	30
Istezljivost (prekidno istezanje), ε [%]			
Uzdužno	2,3	0,9	1,8
Poprečno	0,4	0,4	0,5

Iz podataka u tablici 3.5 može se zaključiti da raspored vlakana bitno utječe na svojstva vlaknastih kompozita odnosno da jednosmjerna vlakna imaju optimalnu krutost i čvrstoću kada je opterećenje paralelno s vlaknima (slika 3.4). Ako opterećenje djeluje paralelno s kontinuiranim jednosmjernim vlaknima, zakonom miješanja može se točno predvidjeti modul elastičnosti, ali pri visokim napreznjima započinje deformiranje matrice te veza između napreznja i istezanja više nije linearna kao što je prikazano slikom 3.5. U slučaju kada opterećenje djeluje okomito na smjer vlakana, komponente djeluju neovisno jedna o drugoj.



Slika 3.4. Utjecaj usmjerenja vlakana obzirom na napreznje [4]



Slika 3.5. Dijagram napreznje – istezanje vlaknima ojačanog kompozita [4]

Čvrstoća kompozita ovisi o vezama između vlakana i matrice te je ograničena deformiranjem matrice. Posljedica ovih okolnosti je da je utvrđena čvrstoća gotovo uvijek manja od predviđene zakonom miješanja, odnosno da je u smjeru vlakana čvrstoća najviša dok je u smjeru okomitom na vlakna čvrstoća najniža. [4]

3.5. Vrste vlaknastih ojačavala

U ovom poglavlju definirana je terminologija koja se primjenjuje za opisivanje vlakana i proizvoda od vlakana. Izrazi vlakno i filament upotrebljavaju se kao sinonimi. Struk (e. *end* ili e. *strand*) je zbir određenog broja vlakana skupljenih zajedno. Ako su vlakna ukončana (e. *twisted*), zbir vlakana naziva se pređa (e. *yarn*). Više skupljenih strukova oblikuje roving. Kao što je već ranije napisano vlakna su obično obložena, tj. apretirana iz nekoliko razloga, uključujući kako bi se vlakna vezala u struk, osiguralo podmazivanje vlakana tijekom prerade, te kao sredstvo za spajanje i natapanje kako bi se osigurala zadovoljavajuća veza između vlakana i materijala matrice. [3]

Vlakna se prema veličini ojačavala mogu podijeliti na diskontinuirana vlakna i kontinuirana vlakna, stoga su u nastavku opisani oblici i proizvodi od vlakana dostupni na tržištu.

3.5.1. Ojačavala s diskontinuiranim vlaknima [3]

Diskontinuirana vlakna ugrađena u matricu mogu biti nasumično orijentirana ili mogu biti orijentirana do neke mjere. Orijentacija diskontinuiranih vlakana obično se postiže tijekom postupka proizvodnje koji se upotrebljava za stvaranje kompozitne tvorevine gdje orijentacija vlakana često odražava smjer protoka materijala kao na primjer tijekom injekcijskog prešanja. Diskontinuirana vlakna se grubo razvrstavaju prema duljini na kratka i sjeckana vlakna.

Kratka (e. *milled*) vlakna proizvode se rezanjem kontinuiranog vlakna na vrlo kratke duljine. Na primjer, kratka grafitna vlakna dostupna su u rasponu $L_{vl.}$ od 0,3 do 3 mm, a kratka staklena vlakna dostupna su u rasponu $L_{vl.}$ od 0,4 do 6 mm.

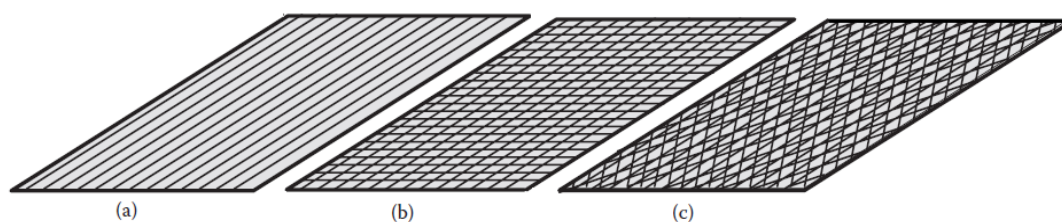
Sjeckana (e. *chopped*) vlakna imaju veću duljinu od kratkih vlakana, a kompoziti proizvedeni sjeckanim vlaknima obično imaju višu čvrstoću i krutost od onih proizvedenih s kratkim vlaknima. Sjeckana grafitna vlakna dostupna su u rasponu $L_{vl.}$ od 3 do 50 mm, dok su sjeckana staklena vlakna dostupna u rasponu $L_{vl.}$ od 6 do 50 mm.

Premda mehanička svojstva kompozita s diskontinuiranim vlaknima nisu toliko dobra kao ona koja se mogu dobiti pomoću kontinuiranih vlakna, diskontinuirana vlakna dopuštaju primjenu relativno jeftinih i brzih postupaka proizvodnje kao što su injekcijsko prešanje, te su zato često korištena u primjenama u kojima nije potrebna iznimno visoka čvrstoća ili krutost. Jedan od najčešće upotrebljivanih kompozita koji se temelje na primjeni diskontinuiranih vlakana poznat je kao osmoljeni mat (e. *sheet moulding compound*, SMC), a u svom najčešćem obliku sastoji se od sjeckanih staklenih vlakna ugrađenih u plastomernu poliestersku smolu.

3.5.2. Ojačavala s kontinuiranim vlaknima

Na slici 3.6 prikazane su tri vrste ojačavala od kontinuiranih vlakana:

a) jednosmjerno ojačavalo, b) ojačavalo od tkane tkanine, c) ojačavalo od pletene tkanine.

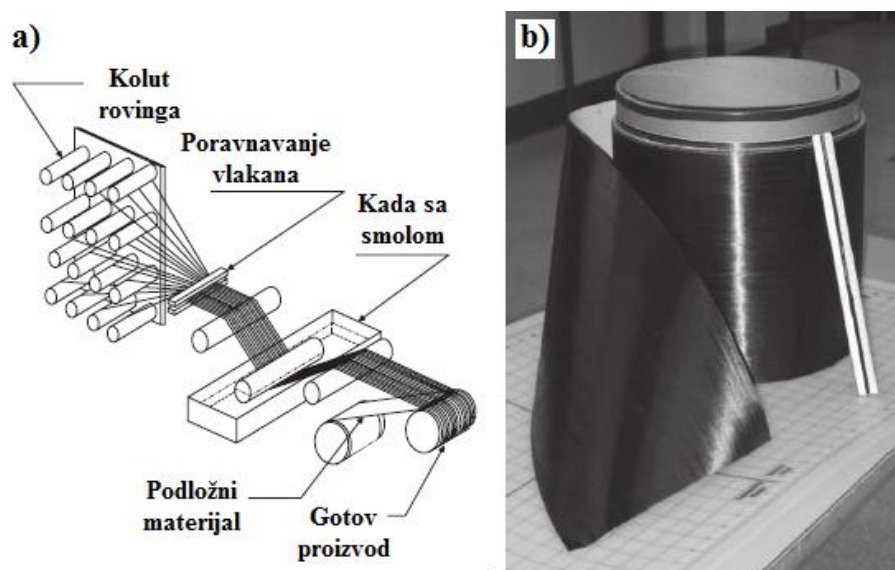


Slika 3.6. Različiti tipovi ojačavala s kontinuiranim vlaknima [3]

Kod jednosmjernog ojačavala sva vlakna su poredana u istom smjeru, a primjenjuju se za izradu proizvoda kod kojih se žele postići bolja mehanička svojstva u jednom smjeru. Tako dolaze do izražaja anizotropna svojstva kompozita odnosno postiže se optimalna krutost i čvrstoća kada je opterećenje paralelno s vlaknima. Primjer jednosmjernog ojačavala je izrada preprega od rovinga. Roving od kontinuiranih vlakana sastoji se od više vlakna paralelno namotanih, bez uvijanja, na kolut odnosno cijev gdje broj vlakana i veličina koluta ovise o krajnjoj upotrebi. [1] Veličina rovinga obično se izražava preko broja vlakana koja se nalaze u jednom rovingu. Tako na primjer, određeno stakleno vlakno može biti dostupno u obliku 2k, 3k, 6k ili 12k rovinga odnosno rovingom koji sadrži od 2000 do 12000 pojedinačnih vlakana. Vlakna na kolutu su obično „suha“ i kombiniraju se s matricom tijekom postupka proizvodnje kao što je namatanje filamenata, pultrudiranje ili u ovom slučaju izrada preprega. [3]

3.5.2.1. Predimpregnirana vlakna ili prepreg

Kod postupka proizvodnje polimernog kompozita u nekom trenutku vlakna ojačavala moraju biti ugrađena u polimernu matricu. Jedan je pristup da se vlakana i smole spajaju tijekom proizvodne operacije u kojoj se definira konačan oblik kompozitne strukture. Drugi, odnosno alternativni pristup je spajanje vlakna i matrice u međukoraku, odnosno proizvodnja poluproizvoda. U ovom slučaju pojedinačni roving ili tanka tkanina od rovinga (koja može biti jednosmjerna, tkana ili pletena tkanina) je ugrađena u polimernu matricu i dostavljena korisniku u tom obliku. Budući da su vlakna već ugrađena u polimernu matricu kada se isporučuju, za vlakna se kaže da su predimpregnirana sa smolom, a proizvodi isporučeni u ovom stanju obično su poznati kao prepreg. [3]



Slika 3.7. Prepreg: a) shematski prikaz postupka izrade, b) rola prepreg trake [3]

Jedan postupak koja se upotrebljava za impregniranje velikog broja jednosmjernih tkanina smolom skiciran je na slici 3.7 a). Kao što je naznačeno, roving se odmata s velikog broja kolutova koji su raspoređeni u relativno uskom pojasu te prolazi kroz kadu sa smolom i zatim se namata na rolu. Inertni sloj podloznog materijala postavlja se između slojeva kako bi se postiglo fizičko razdvajanje slojeva i pomoglo odvajanju slojeva tijekom kasnijeg rukovanja i obrade (odnosno spriječilo lijepljenje slojeva). Roving se podvrgava različitim površinskim predobradama neposredno prije ulaska u kadu sa smolom kako bi se poboljšalo natapanje vlakana smolom, što u konačnici pomaže u osiguravanju dobrog prijanjanja između vlakana i polimerne matrice kod umreženog kompozita. Proizvod proizveden na ovaj način obično se

naziva prepreg traka (slika 3.7 b)). Također moguće je proizvesti tkanine preprega primjenom tkane ili pletene tkanine umjesto jednosmjernog rovinga sličnim proizvodnim postupkom. [3]

Prvi komercijalno uspješni prepreg materijali temeljili su se na epoksidnim smolama u djelomično polimeriziranom stanju, što rezultira relativno visokom viskoznošću koja pomaže prilikom rukovanja prepreg materijalima. Međutim, prepreg se mora skladištiti pri niskim temperaturama, inače smola nastavlja polimerizirati i polako otvrdne. Uobičajeno je da temperatura pohrane preprega mora biti $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ili niža. U praksi se zaliha materijala preprega vadi iz zamrzivača, izdvaja se potrebna količina preprega s role, a ostatak zalihe se vraća u zamrzivač te se bilježi ukupno vrijeme koje je rola bila izvan zamrzivača.

Također postoje i prepreg materijali na bazi plastomernih smola ali u tom slučaju polimerna matrica je potpuno umrežen plastomerni polimer stoga prepreg ne zahtijeva rashlađivanje tijekom transporta ili skladištenja, što je izuzetna prednost.

Toplina i / ili tlak primjenjuju se tijekom konačne izrade kompozita na osnovi prepreg materijala. U slučaju duromernog preprega, toplina i tlak služe za potpunu polimerizaciju smole, dok je za plastomerne preprege cilj smanjiti viskoznost plastomerne matrice kako bi se povezali pojedinačni slojevi unutar laminata. [3]

Osim u jednom smjeru vlakna se mogu orijentirati ili ortogonalno ili pod nekim drugim kutom čime se postiže izotropnost mehaničkih svojstava odnosno osigurava krutost i čvrstoća u više smjerova i postižu jednoličnija svojstva kompozita. [10] Takvu orijentaciju vlakana moguće je postići tkanjem ili pletenjem vlakana u tkaninu (slika 3.6 b) i c)).

3.5.2.2. Tkanje tkanine [3]

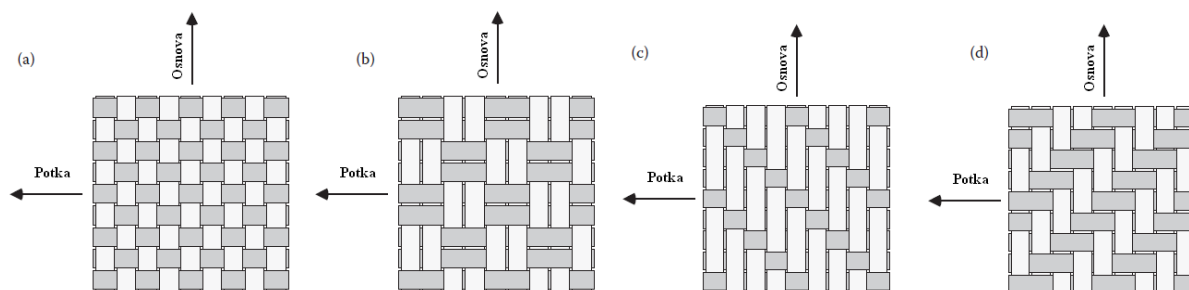
Većina kontinuiranih vlakana visokih svojstava mogu biti tkana u tkaninu. Tkanje se izvodi na tkalačkim strojevima posebno modificiranim za tkanje vlakana visokih svojstava, koja su kruća od obično upotrebljivanih vlakana u tekstilnoj industriji. Tkanje tkanine se proizvode u različitim širinama do 120 cm i dostupne su u gotovo beskonačnim duljinama.

Dva pojma povezana s tkanim tkaninama su:

- roving ili pređa koja prolazi duž duljine tkanine naziva se osnova (e. *warp*). Smjer osnove paralelan je s dugom osi tkanine.

- roving ili pređa koja je položena okomito na osnovu naziva se potkom (e. *fill tow*, e. *weft*, e. *woof tow*). Smjer potke je okomit na smjer osnove.

Neka uobičajena tkanja tkanine prikazana su shematski na slici 3.8.



Slika 3.8. Tipovi tkanih tkanina: a) obično tkanje, b) košara tkanje, c) satensko tkanje, d) keper tkanje [3]

Obično tkanje (e. *plain weave*, PW) koje se još naziva i jednostavnim tkanjem (e. *simple weave*) prikazano je na slici 3.8 a) i proizvedeno je pomoću tkalačkog stroja. Obično tkanje je najjednostavniji uzorak tkanine dostupan i najčešće se primjenjuje. Proizvodi se ponavljanjem tkanja osnove iznad jedne i ispod sljedeće potke. Točka na kojoj roving prolazi iznad / ispod drugog rovinga zove se točka križanja (e. *crossover point*). Obični uzorak tkanja rezultira vrlo stabilnom i čvrstom tkaninom koja pokazuje minimalno izobličenje (npr. klizanje vlakna) tijekom rukovanja.

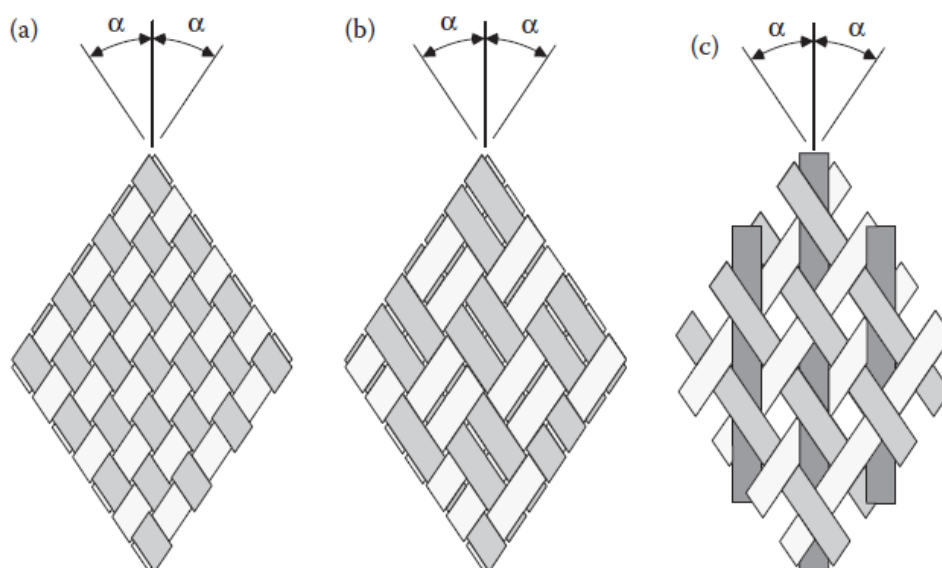
Košara tkanje (e. *basket weave*, BW), (slika 3.8 b)), je varijanta jednostavnog uzorka tkanja u kojem se dvije ili više osnova križaju s jednakim brojem potki, tvoreći pravokutni uzorak sličan običnom tkanju.

Satensko tkanje (e. *satin weaves*, SW) pruža bolja svojstva tkanine nego obično tkanje. To jest, satensko tkanje je savitljivije i lakše će se prilagoditi kompleksno zakrivljenim površinama od običnog tkanja. Četverospregnuto satensko tkanje (e. *four-harness satin weave*) također poznato kao tkalačka tkanina (e. *crowfoot weave*) prikazana je na slici 8 c). U ovom slučaju, jedna osnova prolazi iznad tri potke, a zatim ispod jedne potke. Sličan uzorak satenskog tkanja uključuje peterospregnuto satensko tkanje (e. *five-harness satin weave*), pri čemu jedna osnova prolazi iznad četiri potke, a kod osmerospregnutog satenskog tkanja osnova prelazi iznad sedam, a zatim ispod jedne potke.

Keper (e. *twill*) uzorak tkanja prikazan je na slici 3.8 d). Dvije susjedne osnove prolaze iznad dvije susjedne potke, formirajući dijagonalni uzorak 2 iznad / 2 ispod poznat kao 2×2 keper. Slično tome, keper od 4×4 temeljit će se na uzorku 4 iznad / 4 ispod.

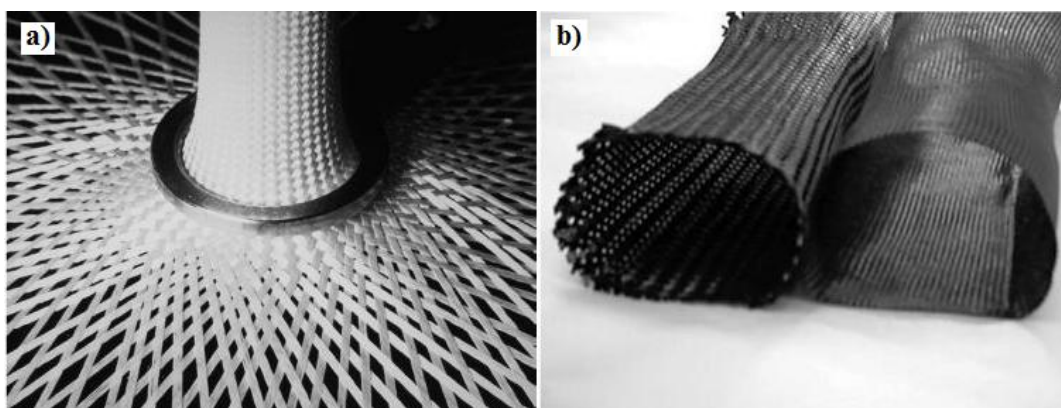
3.5.2.3. Pletene tkanine [3]

U prethodnom odjeljku opisane su tkanine koje sadrže ojačavalo u dva ortogonalna smjera, u smjeru osnove i petke. Nasuprot tome, pletene tkanine tipično sadrže roving orijentiran u dva ili više neortogonalna smjera. Na slici 3.9 prikazana su tri uobičajena uzorka pletiva.



Slika 3.9. Tipovi pletenih tkanina [3]

Vidljivo je s ove slike da se kod pletene tkanine roving presijeca pod ukupnim kutom od 2α . Kut α naziva se ili kut pletenja uzice (e. *braid angle*) ili kut nagiba (e. *bias angle*). Iako se kut pletenja može mijenjati u širokom rasponu, uvijek postoji neka najniža i najviša moguća vrijednost koja ovisi o širini rovinga i pojedinostima upotrebljene opreme za pletenje. U slučaju da je $\alpha = 45^\circ$, tada je roving zapravo ortogonalan, a pletena tkanina prikazana na slici 3.9 a) i 3.9 b) jednaka je tkanoj tkanini. Pletena tkanina opisana je oznakom " $n \times n$ ", gdje je n broj rovinga do točke križanja. Tkanine 1×1 i 2×2 prikazane su na slici 3.9 a) i b). Na slici 3.9 c) prikazana je 1×1 pletena tkanina s tri osi.



Slika 3.10. Cjevasto pletena tkanina: a) izrada b) kvaliteta površine [3]

Pletene tkanine mogu se proizvesti i u cjevastom obliku kao što je prikazano na slici 3.10 a). Roving se odmata s dva koluta rovinga koji se kreću u suprotnim smjerovima na dvije vanjske kružne staze. Kolut s rovingom prolazi sekvencijalno iz jedne staze na drugu, stvarajući isprepleteni uzorak koji je lako vidljiv na slici 3.10 a). Roving se izvlači prema sredini stroja za pletenje i prolazi kroz ploču za oblikovanje s kružnim otvorom. Ako se treba proizvesti troosno pletenje tada se treći set rovinga dodaje okomito preko središnjeg dijela stroja i isprepliće s ostatkom pletiva. Površinska tekstura pletenih cijevi je određena brojem i veličinom rovinga koji se upotrebljava. Primjerice, na slici 3.10 b) prikazane su dvije pletene cijevi od ugljičnih vlakana s istim promjerom. Na slici 3.10 b) lijeva cijev proizveden je pomoću stroja s 96 držača i 12k ugljičnim rovingom. Nasuprot tome, desna cijev na slici 3.10 b) proizvedena je pomoću stroja s 400 nosača i 1k ugljičnim rovingom, što rezultira postizanjem bitno glađe teksture površine cijevi. Po želji, pletene cijevi se mogu naknadno prerezati po duljini kako bi se oblikovala ravna pletena tkanina.

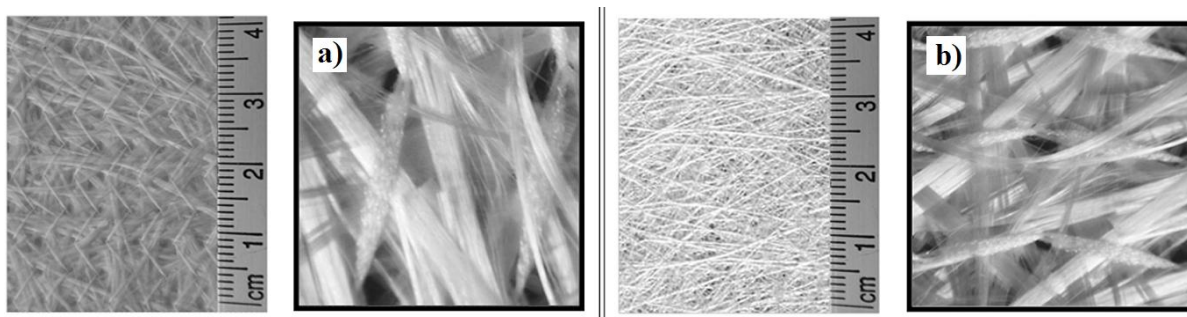
Debljina jednog sloja oblikovanog jednosmjernim vlaknima kreće se od 0,12 do 0,20 mm, dok se debljina jednog sloja tkane ili pletene tkanine kreće od 0,25 do 0,40 mm.

Da bi se proizvela kompozitna struktura sa znatnom debljinom, mnogi slojevi su slagani jedan na drugi kako bi se formirao kompozitni laminat. Konceptualno se može primijeniti bilo koji broj slojeva u laminatu, ali u praksi se broj slojeva obično kreće od 10 sloja do možda čak 200 slojeva.

Osim preprega i tkanina na tržištu ojačavala postoji i mat kao ojačavalo. Stoga su u nastavku opisane dvije vrste mata, mat sa sjeckanim vlaknima i mat s kontinuiranim vlaknima.

3.5.3. Mat ojačavala

Na slici 3.11 prikazana su dva tipa mat ojačavala, sa sjeckanim vlaknima i kontinuiranim vlaknima.



Slika 3.11. Mat ojačavala: a) prošiveni mat sa sjeckanim vlaknima, b) mat s kontinuiranim vlaknima [3]

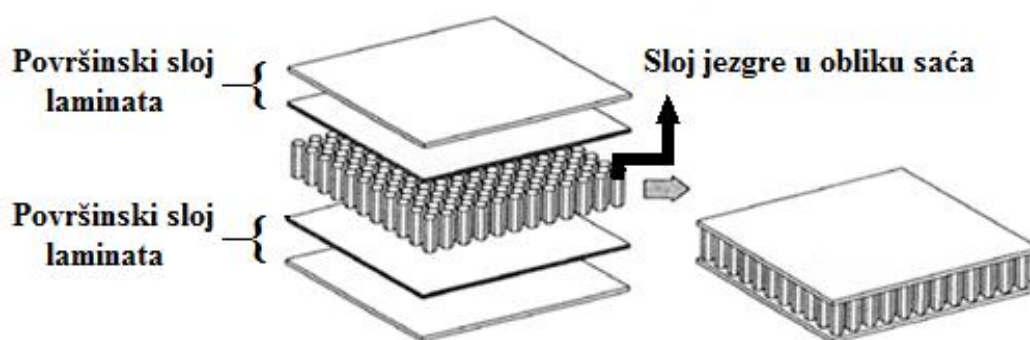
Kod mata sa sjeckanim vlaknima (e. *chopped strand mat*, CSM), roving je sjeckan i raspršen ravnomjerno na mat (slika 3.11 a)). Vlakna su čvrsto povezana za mat ili prošivanjem vlakana okomito na površinu vlaknima istog ili drugog materijala ili posebnim vezivom topivim u matrici. Veziva su obično u dva oblika, u obliku emulzije koja se temelji na polivinil acetatu ili u obliku praha koji se temelji na bifenol poliesteru. Mat ima izvrsna svojstva natapanja smolom tj. brzo se impregnira zbog svoje prozirnosti. U matu nisu dozvoljene šupljine promjera iznad 50 mm. Laminat izrađen s matom rezultira dobrim i podjednakim svojstvima u svim smjerovima. CSM je obično kompatibilan s poliesterskim smolama dok je njegova upotreba s epoksidnim smolama ograničena na prahom vezani mat. [3]

Mat s kontinuiranim vlaknima (e. *continuous filament mat*, CFM) sastoji se od više slojeva kontinuiranih staklenih vlakana koja se nasumično postavljena u obliku kovitlaca (e. *swirl-like pattern*) (slika 11 b)). CFM se sve češće upotrebljava u oblikovanju kalupa, gdje može ispuniti duboke šupljine kalupa, te kod postupka injekcijskog – posrednog prešanja kapljevite smole s uloženim trodimenzionalnim ojačavajućim predoblikom (e. *resin transfer moulding*, RTM). [1]

Prilikom upotrebe neprošivenog mata, mat s kontinuiranim vlaknima imat će bolja svojstva ulijevanja od sjeckanog mata. Također se često upotrebljavaju prošivene tkanine. Te tkanine nisu tkane, nego su međusobno prošivene kako bi se izbjeglo nabiranje. [11]

3.6. Sendvič konstrukcije

Sendvič konstrukcije odnosno sendvič materijali su strukturne kompozitne tvorevine čija svojstva ne ovise samo o svojstvima matrice i ojačavala već o geometrijskom rasporedu elemenata konstrukcije. Sendvič materijali sastoje se od tankih vanjskih, površinskih slojeva laminata spojenih ali ujedno i razdvojenih materijalom male mase za popunjavanje odnosno jezgrom (slika 3.12). [12] Pri savojnom opterećenja konstrukcije, gornji laminat je izložen pritiskom a donji laminat rasteznom naprezanju, dok je jezgra opterećena na smicanje. Stoga je jedno od najvažnijih svojstava jezgre njena smična čvrstoća i krutost. Osim toga, osobito kada se primjenjuju lagani i tanki laminati, jezgra mora moći preuzeti pritisno opterećenje bez pojave prijevremenog loma kako bi se spriječilo nabiranje i pucanje tankih slojeva laminata pod opterećenjem. [13] Materijali površinskih slojeva najčešće su aluminijski limovi ili vlaknima (staklenim ili ugljičnim) ojačani polimeri dok se za jezgru upotrebljava velik broj prirodnih i sintetičkih materijala. [12]



Slika 3.12. Elementi sendvič konstrukcije [12]

U ovom radu obrađene su sendvič konstrukcije na bazi polimernih materijala. Osnovna prednost takvih konstrukcija u odnosu na druge je njihova visoka dinamička čvrstoća, otpornost na zamor materijala, žilavost, te kemijska postojanost. Primjena sendvič konstrukcija određena je sastavom, svojstvima i mogućnošću izrade materijala, te se može podijeliti na primjenu za strukturne i primjenu za nestrukturne dijelove. Strukturni dijelovi su oni koji su u upotrebi izrazito mehanički opterećeni tj. dijelovi kod kojih je pri izboru materijala i dimenzioniranju važno udovoljiti zahtjevima koji su povezani s mehaničkim opterećenjem. Nestrukturni dijelovi su oni kod kojih su zahtjevi u pogledu dekorativnosti (estetike, boje itd.), samogasivosti, kemijske postojanosti, itd.

Sendvič konstrukcija primjenjuju se u građevinskoj (krovovi, podovi, pregradne stijene), u zrakoplovnoj (oplate krila, trupa, repa, unutarnje uređenje zrakoplova), automobilskoj (oplate i unutarnje uređenje automobila, kamiona, željezničkih i ostalih transportnih vozila) i pomorskoj (trup i unutrašnjost broda) industriji. [12]

U nastavku su opisane vrste jezgri i materijali od kojih su izrađene, te su dani primjeri njihovih primjena u različitim industrijskim granama ovisno o njihovim svojstvima.

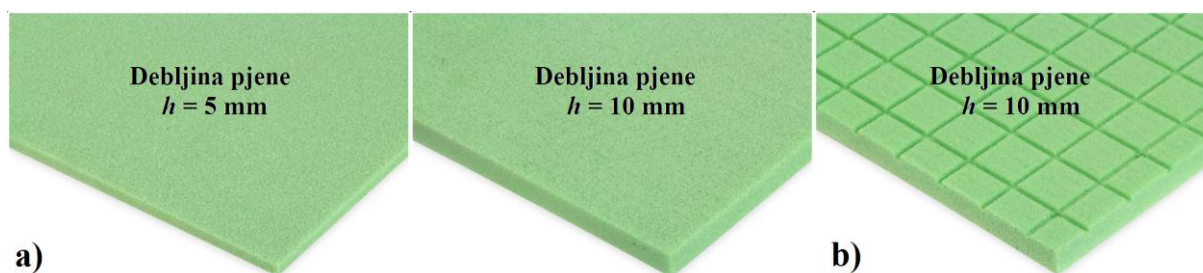
3.6.1. Pjenaste jezgre

Pjene su jedan od najčešćih oblika jezgri, a mogu se proizvesti od raznih polimera uključujući poli(vinil-klorid) (PVC), poliuretan (PUR), polistiren (PS), poli(etilen-tereftalat) (PET), poli(metakril-imid) (PMI), poli(eter-imid) (PEI) i stiren/akrilonitril (SAN). Pjene se mogu proizvesti s gustoćom od 30 kg/m³ do više od 300 kg/m³, iako se gustoća najčešće upotrebljivanih pjena za konstrukcijske kompozite kreće od 40 do 200 kg/m³. Također se proizvode u različitim debljinama od 5 mm do 50 mm. [13] Pjene koje se primjenjuju za postupak ručnog laminiranja razlikuju se od pjena koji se primjenjuju za postupak potlačnog ulijevanja jer moraju imati zatvorene pore kako pjenasti materijal u kalupu ne bi upijao smolu pod utjecajem podtlaka. Također kako bi se osiguralo protok smole oko pjene, jezgre imaju izrađene rupice i kanale na površini. Kanali na površini smješteni su tako da djeluju kao sustav za raspodjelu smole. Pjene mogu biti u obliku ravne ploče ili ploče s urezanim kanalima za primjenu kod dijelova s kompliciranom geometrijom. [14]

3.6.1.1. Poli(vinil-klorid)ne (PVC) pjene

PVC pjene nude uravnoteženu kombinaciju statičnih i dinamičkih svojstava te svojstvo male apsorpcije vode. Pjene imaju veliki interval radnih temperatura od -240 °C do 80 °C, a također su postojane na mnoge kemikalije, otapala i većinu goriva. PVC pjene dostupne su u različitim gustoćama od 45 kg/m³ do 400 kg/m³. Iako su PVC pjene općenito zapaljive, postoje vrste pjena koje usporavaju gorenje te se mogu primijeniti u mnogim primjenama gdje postoji opasnost od požara. PVC pjena upotrebljava se za izradu jezgre u sendvič konstrukcijama zbog svoje postojanosti na stiren i svojstva dobrog povezivanja sa smolom što je čini i popularnom u mnogim industrijama. Obično se isporučuje u obliku ploče koja može biti obična ravna ili s urezanim kanalima kako bi se omogućilo lakše oblikovanje jezgre po

zakrivljenim površinama kalupa (slika 3.13). [13] PVC pjene najčešće se primjenjuju u pomorskoj, vjetro-energetskoj i transportnoj industriji te za zaštitu od korozije. [15]



Slika 3.13. Ploča PVC pjene a) obična ravna, b) ravna s urezanim kanalima [16]

Postoje dvije vrste PVC pjena: krute i savitljive PVC pjene.

Krute PVC pjene, poznate i kao umrežene PVC pjene, imaju višu postojanost pri povišenim temperaturama i višu postojanost na otapala, odnosno 20 – 40 % viša svojstva nego duktilne pjene iste gustoće. Krute PVC pjene mogu se primijeniti do temperature od 80 °C odnosno kontinuirano se upotrebljavati pri temperaturi od 70 °C. Pri niskim temperaturama ne postaju krhke odnosno čak se mogu primijeniti u kriogenim primjenama. Zbog svojih svojstava primjenjuju se za izradu ploča koje su manje osjetljive na mekšanje i puzanje pri povišenim temperaturama. [13]

Savitljive PVC pjene, poznate i kao linearne PVC pjene, imaju višu lomnu deformaciju pri smicanju (iznad 40 %) u odnosu na krute pjene. Savitljive PVC pjene mogu se primijeniti do temperature od 65 °C i kontinuirano se upotrebljavati pri temperaturi od 50 °C. Zbog svojstva savitljivosti ove pjene se lakše toplo oblikuju na zakrivljenim površinama kalupa. [13]

3.6.1.2. Poliuretanske (PUR) pjene

PUR pjenasta jezgra izrađena od pjenećeg poliuretana sa zatvorenim porama može se proizvesti u širokom rasponu gustoće i debljina. Premda strukturna svojstva PUR pjenaste jezgre nisu prikladna za mehanički zahtjevnije primjene, ove pjene našle su široku primjenu u industriji kompozita za povećavanje debljine kompozitnih tvorevina, te zbog svojih izolacijskih svojstava. [15] Pod pojmom krute PUR pjene podrazumijevaju se dvije vrste polimera: poliizocijanurat (PIR) i poliuretan (PUR). Materijali se razlikuju i po načinu proizvodnje i po svojim svojstvima. [13]

Poliizocijanuratne pjene su pjene niske gustoće koje se proizvode kontinuiranim postupkom ekstrudiranja u obliku velikih blokova iz kojih se na strojevima izrezuju ploče i drugi oblici.

Ove pjene imaju dobra izolacijska svojstva, dobru pritisnu čvrstoću i postoje su pri temperaturi do 150 °C. Izrađuju se u velikim količinama s gustoćom između 30 i 100 kg/m³ i relativno su jeftine. Poliizocijanuratne pjene mogu se prepoznati po svojoj karakterističnoj krutosti i krutosti površinskog sloja odnosno drobljivosti. [13]

Primjena poliizocijanuratne pjena za izradu kompozitnih ploča ograničena je upravo zbog njene krhkosti površinskog sloja što može uzrokovati odvajanje laminata i pjene u području kontaktne površine uzrokovanog vibracijama ili savijanjem sendvič konstrukcije. Iz tog se razloga ove pjene ne primjenjuju za konstrukcije pod opterećenjem već se upotrebljavaju samo kako bi osigurale oblik proizvoda. Najčešće se primjenjuju za izolaciju u hladnim komorama i u građevinama za izolaciju zidova. [13]

Poliuretanske pjene su pjene koje se proizvode kontinuiranim postupkom ekstrudiranja u obliku velikih blokova iz kojih se na strojevima izrezuju ploče i drugi oblici. Ponekad se ove pjene lijevaju u kalupe kako bi se izravno oblikovale u zadani oblik dijelova. [13]

Poliuretanskim pjenama može se znatno povisiti čvrstoća i žilavost u odnosu na poliizocijanuratne pjene, ali se time snizuje modul i čvrstoća pjene pri visokim temperaturama. Takve pjene mogu se primjenjivati, ovisno o postupku izrade, pri temperaturama do 135 °C a da zadrže znatan udio svoje čvrstoće i žilavosti. To im omogućuje da se primjenjuju za izradu ploča i s pre-preg materijalima koji umrežuju pri visokim temperaturama u peći ili autoklavu. Gustoća pjene kreće se od 30 do 800 kg/m³, a za razliku od plastomernih pjena cijena poliuretanske pjene linearno se povećava s gustoćom. Najčešće se primjenjuju za izradu unutarnjih površina zrakoplova, dijelova kompozitne konstrukcije brodova, te kao materijal za jezgre alata i sportske opreme. [13]

3.6.1.3. Polistirenske (PS) pjene [13]

Premda su PS pjene našle široku upotrebu u proizvodnji jedrilica i surferskih daski, gdje su njihova mala masa (40 kg/m³), niska cijena i jednostavnost obrade glavne karakteristike, rijetko se upotrebljavaju za visoko opterećene konstrukcije zbog niskih mehaničkih svojstava. Također ne mogu se upotrebljavati s poliesterskim smolama jer će stiren iz smole otopiti poliestersku pjenu što ograničava primjenu PS pjena.

3.6.1.4. Poli(etilen-tereftalat)ne (PET) pjene [15]

PET je plastomer od kojeg se proizvodi jeftina ali strukturno čvrsta jezgra (slika 3.14). PET jezgre se mogu zagrijati i oblikovati prema traženom obliku, a primjena jezgri se povećava kako proizvođači shvaćaju dosljednost njenih svojstava i prednosti ove pjene, te ekonomičnost primjene PET jezgra za strukturne kompozite.



Slika 3.14. PET pjena

3.6.1.5. Poli(metakril-imid)ne (PMI) pjene [13]

PMI pjene imaju jednu od najviših vrijednosti čvrstoće i krutosti pjenastih jezgri. Neka od njihovih svojstava također uključuju visoku dimenzijsku stabilnost, visoku postojanost na zamor materijala te mogućnost umreživanja i primjene pri povišenim temperaturama. Zbog visokih svojstava pjene ali i visoke cijene ovih pjena, primjena PMI pjena dosad je uglavnom bila za visoko opterećene dijelove kao što su lopatice rotora helikoptera.

3.6.1.6. Poli(eter-imid)ne (PEI) pjene [15]

PEI je plastomer koji se primjenjuje u zrakoplovnoj industriji, a kada ekspandira kako bi se postigle različite gustoće pjene, PEI pjena pokazuju dobra mehanička svojstva i prolazi najstrože zrakoplovne protupožarne norme. Može se toplo oblikovati, ali ima visoku postojanost pri povišenim temperaturama što omogućuje upotrebu pjene u autoklavu. Pjena ostaje duktilna i pri kriogenim temperaturama. Obično se primjenjuje za radarske kupole zbog svoje propusnosti radarskih zraka, te za unutrašnjost u avionima. Također se primjenjuje za izolaciju kriogenskih spremnika.

3.6.1.7. Kopolimerna stiren/akrilonitrilne (SAN) pjene [13]

SAN pjena se upotrebljava za izradu jezgri sa zatvorenim porama s karakterističnim svojstvima visoke žilavosti i kemijske postojanosti. Odnosno SAN pjena ima slična svojstva krutih PVC pjena, ali pokazuju više istezanje i čvrstoću stoga mogu apsorbirati viša udarna

opterećenja od PVC pjena. SAN pjene zamjenjuju linearne PVC pjene u mnogim primjenama, budući da imaju višu čvrstoću i istezljivost od PVC pjena uz viša statička svojstva i postojanost pri povišenim temperaturama. Također se mogu toplo oblikovati što omogućava izradu zakrivljenih dijelova u kalupu. Toplinski stabilizirane vrste SAN pjena također se mogu upotrijebiti u niskotemperaturnim postupcima s prepregom.

3.6.2. Jezgre u obliku saća

Jezgre u obliku saća mogu biti izrađene od papira ili kartona za niska opterećenja odnosno niskih svojstava čvrstoće i krutosti ili s visokom čvrstoćom i krutošću za visoko opterećene dijelove konstrukcije zrakoplova. Jezgre u obliku saća mogu se izraditi kao ravne ili zakrivljene ploče tako da prate konturu zakrivljene površine kalupa bez pretjerane primjene mehaničke sile ili grijanja. [13]

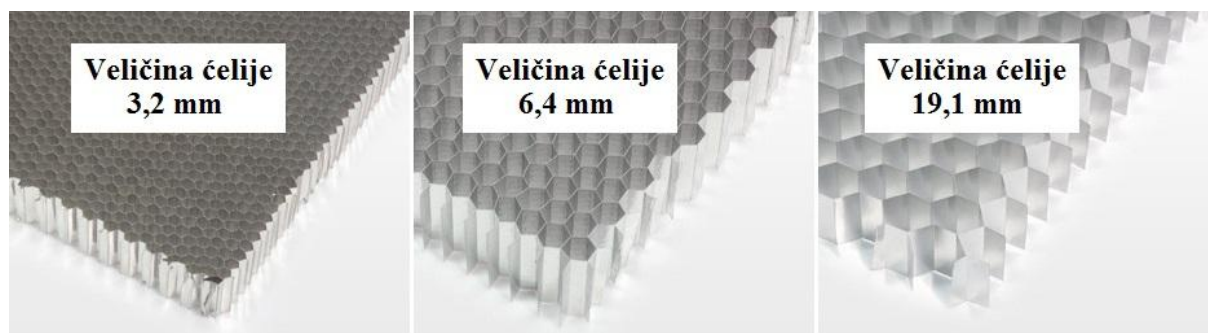
Plastomerne saće, najčešće izrađene od polipropilena (PP) ekstrudiranjem, režu se na potrebnu debljinu. Druge vrste saća, kao što su one od papira i aluminijske, izrađuju su u više faza. Čelije saća mogu se također napuniti krutom pjenom kako bi se postigla veća kontaktna površina između vanjskog sloja laminata i saća, te povisila mehanička svojstva jezgre stabilizacijom stijenki ćelija. Time se također povisuju i svojstva toplinske i zvučne izolacije. [13]

Svojstva saća ovise o veličini odnosno broju ćelija te o debljini i čvrstoći materijala stijenki ćelija. Debljina materijala može biti u rasponu od 3 do 50 mm, a uobičajene dimenzije ploča su 1,2 m x 2,4 m, premda je moguće proizvesti jezgre i do 3 m x 3 m. [13] Zbog svoje male mase, jezgre u obliku saća najčešće se primjenjuju u zrakoplovnoj, vojnoj i pomorskoj industriji. [15]

3.6.2.1. Aluminijske saće

Aluminijske saće imaju jedan od najvećih omjera čvrstoće i mase od bilo kojeg konstrukcijskog materijala. Postoje različiti načini lijepljenja aluminijske folije što omogućuje izradu ćelija različitih geometrijskih oblika premda je uobičajen oblik ćelije šesterokut. Svojstva se također mogu kontrolirati mijenjanjem debljine folije i veličine ćelija (slika 3.15). Unatoč dobrim mehaničkim svojstvima i relativno niskoj cijeni, pri određenim primjenama aluminijskih saća postoje određena ograničenja. Kod primjene za konstrukcije izložene

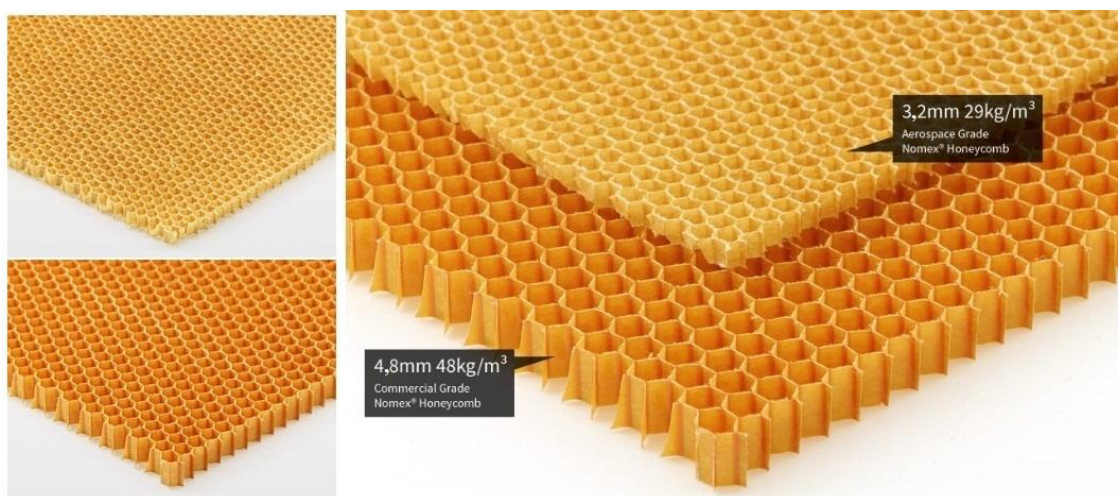
morskoj atmosferi može doći do korozije zbog soli u vodi i zraku. Također aluminijske ćelije ne smiju doći u izravan kontakt s ugljičnim vlaknima zbog moguće pojave galvanske korozije. Aluminijske saće također imaju malen elastičan povrat stoga će se kod udarnog opterećenja slojevi saće nepovratno deformirati dok će se slojevi laminata, koji su elastičniji, vratiti u prvobitni položaj što će rezultirati odvajanjem slojeva i smanjenjem mehaničkih svojstava sendvič konstrukcije. [13]



Slika 3.15. Aluminijske saće debljine $h = 10$ mm [16]

3.6.2.2. Nomex saće

Nomex saće napravljene su od Nomex papira odnosno oblik papira koji umjesto celuloznih vlakana ima aramidna vlakna (slika 3.16). Saće su uronjene u fenolnu smolu kako bi se proizvela saćasta jezgra visoke čvrstoće i dobre postojanosti na plamen. Primjenjuje se za izradu laganih ploča unutar zrakoplova, a također se može primijeniti i u unutrašnjosti javnog prijevoza gdje su ćelije saća ispunjene fenolnom pjenom radi bolje izolacije i prijanjanja. [13] Nomex saće se sve više primjenjuju u ne-zrakoplovnim primjenama zbog visokih mehaničkih svojstava, niske gustoće i dobre dugoročne stabilnosti, međutim nedostatak im je što su znatno skuplje od drugih jezgrenih materijala. [13]



Slika 3.16. Nomex saće [16]

3.6.2.3. *Plastomerne saće [13]*

Jezgre izrađene od plastomera su lagane, s dobrim svojstvima i mogućnošću recikliranja. Njihov glavni nedostatak je poteškoća postizanja dobre prionjivosti između saća i laminata. Neki od materijala koji se primjenjuju za izradu saća su:

- Akrilonitril/butadien/stiren (ABS) – za krute, žilave, površinski tvrde i dimenzijski stabilne konstrukcije
- Polikarbonat (PC) – za UV stabilnost, odličan prijenos svjetlosti, dobra postojanost pri povišenim temperaturama i svojstvo samogasivosti konstrukcije
- Polipropilen (PP) – za dobru kemijsku postojanost konstrukcije
- Polietilen (PE) – jeftin materijal za izradu jezgri opće namjene

3.6.3. *Drvene jezgre*

Struktura drva može se opisati kao saće jer je struktura drva na mikroskopskoj skali slična ćelijama šesterokutnih saće. Kada se drvene jezgre primjenjuju u sendvič konstrukcijama s vlaknima okomitim na ravninu laminata, dobivena tvorevina pokazuje slična svojstva konstrukcijama sa saćama od sintetskih materijalima. Međutim, unatoč raznim kemijskim postupcima, sve drvene jezgre su osjetljive na vlagu i propadaju ako nisu izolirane smolom. [13]

3.6.3.1. *Balsa*

Najčešće upotrebljavana drvena jezgra je balsa te je ujedno jedini jezgreni materijal koji dolazi iz prirode i iz obnovljivih izvora. Drvena jezgra balsa se prvi put počela primjenjivati 1940-ih godina za izradu trupova hidro aviona, koji su bili aluminijski s balsa jezgrom kako bi mogli izdržati udarce uslijed slijetanja na vodu. Iz tog razloga se balsa počela primjenjivati u pomorskoj industriji za kompozitne konstrukcije. Osim visoke pritisne, savojne i smične čvrstoće te krutosti balsa nudi dobru toplinsku i akustičnu izolaciju. Materijal se neće deformirati kada se zagrije, a lako se obrađuje jednostavnim alatima (slika 3.17). [13]

Balsa jezgre dostupne su u obliku ploča s urezanim kanalima debljine od 3 do 50 mm, te kao krute ploče debljina do 100 mm. Gustoća materijala kreće se u rasponu od 100 do 260 kg/m³. Nedostatak balsa jezgre je njena visoka gustoća od 100 kg/m³ što može postati problem jer balsa apsorbira veliku količinu smole tijekom laminiranja, iako se to može ograničiti

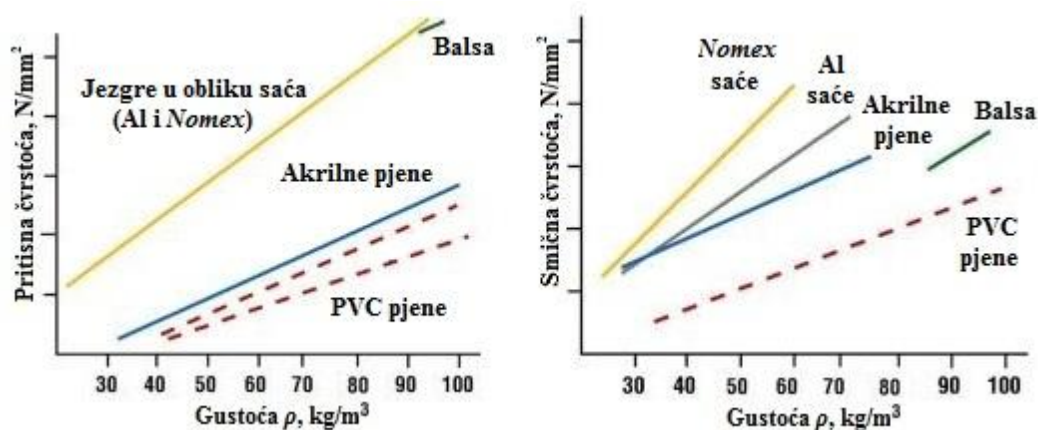
prethodnim brtvljenjem pjenom. Balsa se stoga upotrebljava za projekte u kojima nije potrebna optimalna ušteda na masi ili lokalno na visoko opterećenim područjima. [13] Odnosno balsa se najčešće primjenjuje u izradi brodova, lopatica vjetro-turbina, transportnih i konstrukcijskih kompozitnih ploča. [15]



Slika 3.17. Balsa jezgre [16]

3.6.4. Svojstva jezgri [13]

Na slici 3.18 prikazane su pritisna i smična čvrstoća nekih od opisanih jezgrenih materijala u odnosu na njihovu gustoću. Sve vrijednosti na dijagramima uzete su iz podataka proizvođača.



Slika 3.18. Svojstva jezgrenih materijala [13]

Očekivano sve jezgre pokazuju povišenje svojstava s povećanjem gustoće međutim drugi čimbenici osim gustoće, također su bitni kada se govori o masi jezgre u sendvič kompozitima. Tako materijal pjene niske gustoće često ima visoku poroznost što može značiti da će apsorbirati veliku količinu smole u području kontaktne površine. Odnosno što je niža gustoća pjene to je viša poroznost, odnosno veći problem. S druge strane prednost jezgri u obliku saća

je što se kod ćelijaste strukture oblikuje samo mali film smole oko zidova ćelije koji povezuje jezgru i laminat.

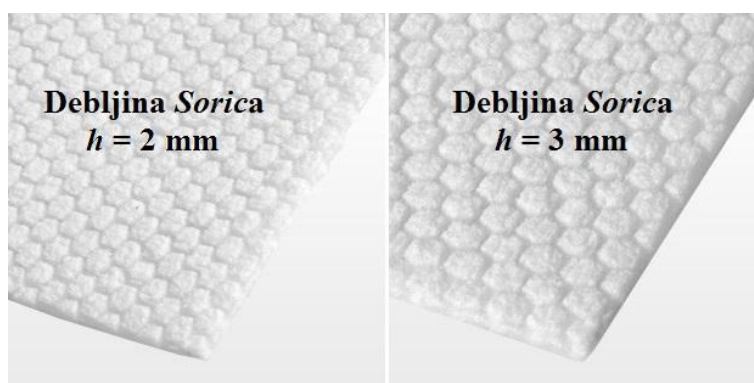
Također treba uzeti u obzir oblik upotrebljavane jezgre kako bi se osiguralo da jezgra dobro odgovara tvorevini. Ušteda na masi koja se može postići primjenom jezgre, može se lako iskoristiti ako je jezgra loše odabrana. Kod proizvoda sa zakrivljenim konturama najčešće se primjenjuju pjene ili balsa s urezanim kanalima kako bi jezgra što bolje pratila konturu. Problem je što između svakog kvadratića jezgre prazninu popunjava smola, stoga se u tim slučajevima treba razmotriti mogućnost primjene jezgre koja se može toplo oblikovati. Linearni PVC i SAN pjene mogu se zagrijati do točke omekšavanja te oblikovati kako bi poprimile potreban oblik.

U postupcima izrade kompozitnih tvorevina kako bi se postigla potrebna debljina kompozita, osim navedenih jezgri primjenjuju se još i ispune u obliku netkanih tkanina. Najpoznatiji predstavnici ispuna su *Soric* i *Coromat*.

3.6.5. *Soric*

Soric je netkani poliester s heksagonalnom ćelijastom strukturom otpornom na stlačivanje. Ćelije su odvojene kanalima koji olakšavaju protok smole i stvaraju šesterokutni uzorak umrežene smole s dobrim mehaničkim svojstvima. Same ćelije ne upijaju smolu, što je dodana prednost pri smanjenju udjela smole u konačnoj tvorevini (slika 3.19). [5]

Najčešće se primjenjuje kao tanka jezgra (povećava krutost uz malo povećanje mase kompozitne tvorevine), sloj između vlakana koji omogućuje protok smole te kao kozmetički i završni sloj. [5]

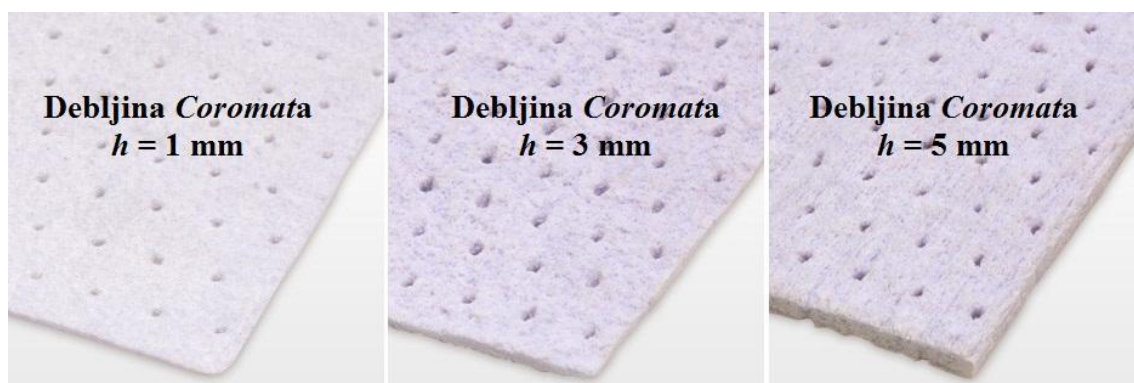


Slika 3.19. *Soric* tkanina [16]

3.6.6. Coromat

Coromat je netkani poliester koji sadrži zatvorene mikrosfere i upija male količine smole. *Coromat* služi kao jezgra u kompozitnim tvorevinama za povećavanje debljine i krutosti, kako bi se postigla potrebna debljina tvorevine uz malo povećanje mase. Primjena *Coromata* smanjuje masu tvorevine za 30 % u usporedbi s kompozitima ojačanim staklenim vlaknima uz smanjenje cijene izrade kompozitne tvorevine samo ojačane staklenim vlaknima. [5]

Coromat tkanina postoji u debljinama od 1 mm do 5 mm, (slika 3.20).

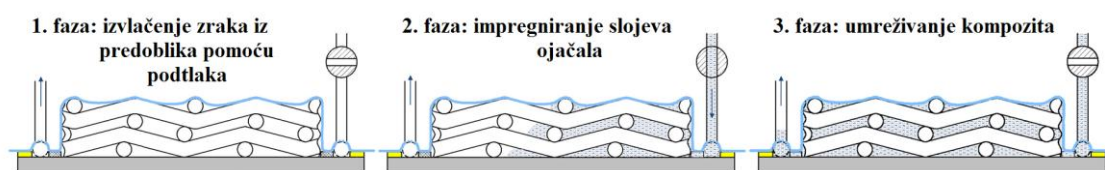


Slika 3.20. *Coromat* tkanina [16]

4. POSTUPAK PODTLAČNOG ULIJEVANJA

Današnja industrija kompozita suočena je s izazovima. Povećana regulativa zaštite okoliša i ograničenja izloženosti radnika hlapljivim organskim spojevima (e. *volatile organic compounds*, VOC) u radnom okruženju prijeti smanjenju konkurentnosti industrije polimernih kompozita. Pregled glavnih sektora industrije pokazuje da se najčešće primjenjuje proizvodni postupak otvoreno kalupljenje, tj. ručno laminiranje i dodirni postupak sa štrcanjem. Zbog upotrebe materijala s visokim udjelom hlapljivih spojeva (30 – 45 %) korisnici tih postupaka su dužni tražiti nove postupke za zamjenu proizvodnje koju primjenjuju kako bi mogli poštivati novo zakonodavstvo. [17]

Kod uobičajenog ručnog laminiranja, ojačavalo se postavlja u kalup i ručno se natapa pomoću četki, valjaka ili drugim sredstvima što rezultira isparavanjima i prekomjernom masom smole u odnosu na tkaninu. Poboljšanje tog postupka je primjena podtlačnog oblikovanja s vrećom za isisavanje viška smole iz laminata. Podtlačno oblikovanje vrećom uvelike poboljšava omjer vlakana i smole što rezultira čvršćim i lakšim proizvodom, premda još uvijek postoji ručno natapanje laminata zbog čega će laminat uvijek biti u prezasićenom stanju. Podtlak će ukloniti veći dio viška smole, ali uklonjena količina još uvijek ovisi o različitim parametrima, uključujući vrstu ojačavala i smole, vremenske i druge čimbenike. [11] U slučaju proizvodnje malih serija velikih dijelova, RTM postupak nije isplativ jer uključuje visoke troškove opreme posebno izrada složenih i teških kalupa koji mogu podnijeti tlak ubrizgavanja smole. [17] Zbog toga je razvijen postupak podtlačnog ulijevanja (e. *vacuum infusion process*, VIP). U ovom postupku slojevi ojačavala stavljaju se u kalup "suha", tj. bez natapanja smolom, te se zatim na predoblik od ojačavala postavlja posebna polimerna folija za brtvljenje nakon čega se izvuče zrak iz materijala u kalupu pomoću podtlačne pumpe. Nakon što je sav zrak uklonjen iz kalupa i ojačavala su potpuno komprimirana, smola pomiješana s umreživalom uvodi se u kalup kako bi impregnirala predoblik. Nakon što je smola potpuno prodrla kroz ojačavala, opskrba smolom se prekida, a kompozit u kalupu ostavlja se da umreži (slika 4.1). [18]



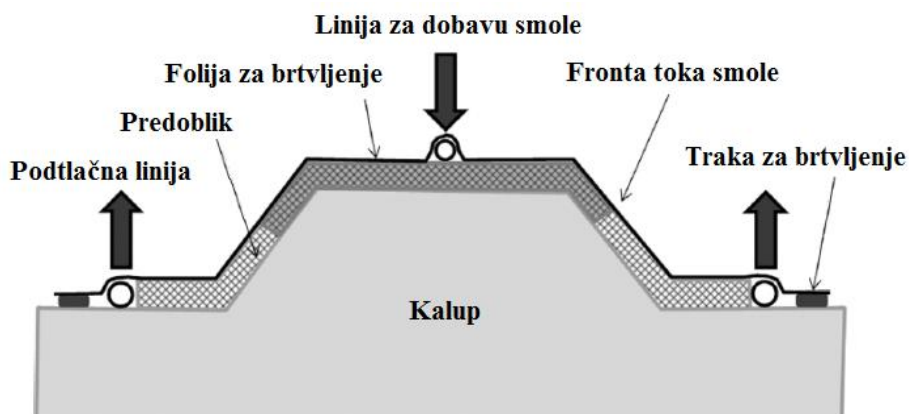
Slika 4.1. Postupak podtlačnog ulijevanja (VIP) [19]

4.1. Inačice postupka podtlačnog ulijevanja

Tijekom godina mnoga unaprjeđenja pomogla su da postupak podtlačnog ulijevanja postane ekonomski održivi te da danas na tržištu postoje različite inačice postupka. Među njima se mogu spomenuti: podtlačno injekcijsko prešanje kapljevite smole (e. *vacuum-assisted resin transfer moulding*, VARTM), postupak podtlačnog ulijevanja Seeman (e. *Seeman composite resin infusion molding process*, SCRIMP), postupak utjecanja na sabijenost predoblika podtlakom (e. *vacuum induced preform relaxation*, VIPR), postupak injekcijskog prešanja recirkulirajuće smole (e. *resin injection recirculation method*, RIRM) te Prestovac postupak. Zapravo, ovi su postupci izvedeni iz izvornog Markovog postupka, razvijenog 1940-ih, stoga dijele mnoge zajedničke značajke. [17]

4.1.1. Postupak podtlačnog injekcijskog prešanja kapljevite smole (VARTM) [7]

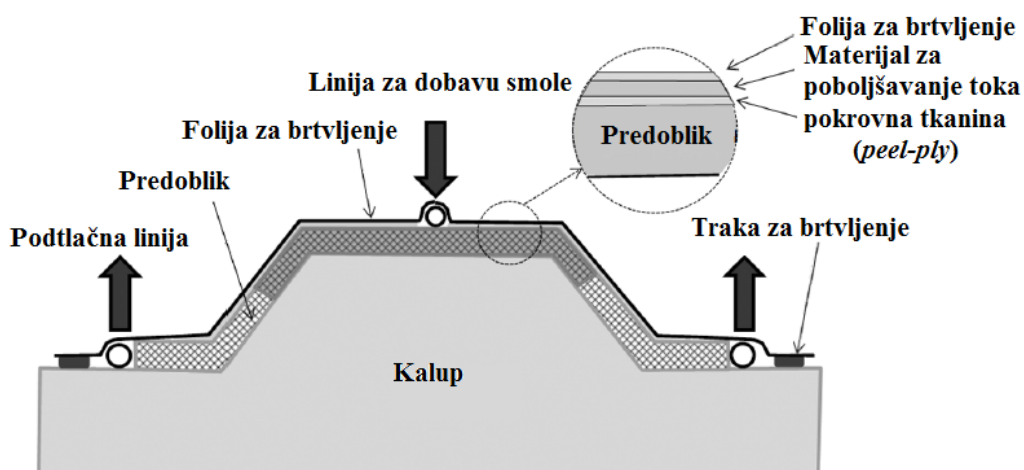
VARTM postupak spaja prednosti visoke kvalitete i ponovljivosti RTM postupka s prednostima fleksibilnosti i dimenzijske prilagodljivosti otvorenih kalupa za ručni dodirni postupak. U ovom postupku upotrebljava se jednostrani kruti kalup koji se brtvi fleksibilnom folijom kako bi se postigao podtlak, tj. uklonio zrak iz kalupa i postiglo sabijanje predoblika postavljenog na površinu kalupa (slika 4.2). Upravo zbog primjene podtlaka za uvlačenje smole u predoblik i folije za brtvljenje umjesto krute gornje polovice kalupa pojavljuju se određeni nedostaci u odnosu na RTM postupak. Zbog rastezljive prirode folije debljina predoblika i volumni udio vlakana variraju kao funkcija tlaka smole u kalup, a najviši tlak kojim se smola uvlači u kalupu ograničen je razlikom između atmosferskog tlaka i taka u kalupu, što znači da vrijeme ulijevanja može postati puno duže od vremena koje je potrebno da smola počne gelirati. Poboljšanje ovog postupka je SCRIMP postupak.



Slika 4.2. VARTM postupak [7]

4.1.2. Postupak podtlačnog ulijevanja Seeman (SCRIMP) [7]

SCRIMP postupak prevladava nedostatak sporog ulijevanje VARTM postupka uslijed ograničenog diferencijalnog tlaka dodavanjem pokrovne tkanine (e. *peel-ply*) i materijala za poboljšanje protoka znatno veće poroznosti, a time i veće propusnosti od predoblika. Postavljanjem tih slojeva između predoblika i folije kao što je prikazano na slici 4.3, smola u početku prolazi kroz materijal za poboljšanje protoka zbog velike propusnosti, a zatim prodire u smjeru debljine predoblika, što je obično reda veličine 3 mm, odnosno puno je brže u usporedbi s prodiranjem smole kroz materijal u ravni što je obično dužine od 10 – 100 m. Konstrukcija materijala za poboljšavanje protoka, tj. njegova veličina i položaj u kalupu, mora biti pažljivo odabrana kako bi se osiguralo potpuno punjenje kalupa, jer bi inače smola mogla doći do podtlačnog priključka i pumpe prije nego je potpuno impregniran predoblik. U usporedbi s RTM-om, problem gradijenta tlaka kod volumnog udjela vlakana i dalje ostaje zbog nepostojanja krutog gornjeg dijela kalupa kojim bi se spriječilo širenje predoblika kako u njega ulazi smola.



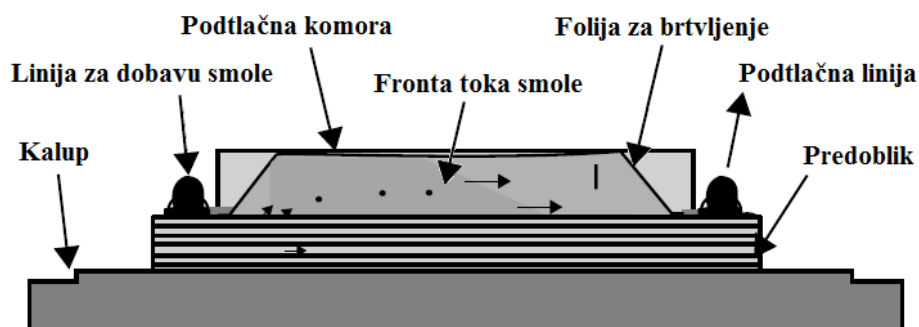
Slika 4.3. SCRIMP postupak [7]

4.1.3. Postupak utjecanja na sabijenost predoblika podtlakom (VIPR) [7]

VIPR postupak je izmijenjena inačica VARTM i SCRIMP postupka koja svojom konstrukcijom pomaže u skraćivanju vremena ulijevanja. U ovom se postupku podtlačna komora postavlja na dio folije za brtvljenje ispod koje se lokalno smanjuje tlak sabijanja predoblika, čime se privremeno povećava njegova propusnost i poroznost, te omogućuje smoli da brže struji u tom području kao što je prikazano na slici 4.4.

Ova modifikacija postupka podtlačnog ulijevanja ne samo da smanjuje vrijeme ulijevanja smole u kalup nego također omogućuje usmjeravanje toka smole u područja koja se teško impregniraju jer povećava propusnost odnosno poroznost.

Međutim, potrebno je pažljivo odabrati mjesto postavljanja vanjske podtlačne komore i trajanje njena djelovanja kako bi se postigla željena modifikacija protoka i osiguralo potpuno punjenje kalupa.



Slika 4.4. VIPR postupak [7]

4.2. Postupka podtlačnog ulijevanja

Ključ uspješnog postupka podtlačnog ulijevanja je imati svu potrebnu opremu i pripremiti sve unaprijed. Jednom kada je smola pomiješana s umreživalom, ako nešto krene po zlu, obično je prekasno učiniti nešto po tom pitanju. Bilo kakav problem kao što je nedostatak smole, gubitak podtlaka ili propuštanje folije za brtvljenje gotovo će sigurno rezultirati škartom. To znači da je za izvođenje ovog postupka neophodno sustavno planiranje. [18]

4.2.1. Priprema površine kalupa

Kalup za postupak podtlačnog ulijevanja je sličan kalupu za ručno laminiranje s tom razlikom da mora imati još i dodatni prostor oko rubova odnosno prirubnicu. Područje prirubnice primjenjuje se za postavljanje linije dobave smole i podtlačne linije. Ponekad je moguće pronaći dovoljno prostora na postojećem kalupu kako bi se svi dijelovi postavili unutar prostora kalupa. [18]

Kalup treba biti krut i imati površinu visokog sjaja. Kvaliteta obrade površine kalupa u izravnoj je vezi s površinom dobivenog proizvoda. Nakon što je površina kalupa pravilno očišćena, na nju se nanosi odvajalo (sredstvo za odvajanje iz kalupa) i gelna prevlaka. [11]

Odvajalo je sloj materijala koji se nanosi na kalup kako bi se spriječilo lijepljenje gotove kompozitne tvorevine za kalup, te osiguralo jednostavno vađenje gotovog proizvoda, bez oštećenja. Debljina sloja odvajala na kalupu kreće se između 0,1 μm i 1 μm , tako da se geometrija kalupa preslikava na odljevak. Odvajalo se nanosi pamučnom krpom na manju površinu kalupa te se nakon nekoliko sekundi počinje sušiti stoga ga je potrebno istrljati čistom suhom krpom kako bi se uklonio višak. Broj nanosenih slojeva ovisan je o stanju kalupa i vrsti odvajala. Vremenski intervali između pojedinih nanosa kao i između posljednjeg nanosa i početka proizvodnje variraju ovisno o vrsti odvajala i uvjetima sušenja. [8] Ako će se dio umreživati pri okolišnoj temperaturi, konvencionalni vosak za odvajanje prikladan je za površinu odvajanja kalupa. Ako se umreživanje ubrzava povišenjem temperature, umjesto voska treba primijeniti kemijsko sredstvo postojano na temperaturu. Također je potrebno pokriti cijelu površinu kalupa i prirubnice odvajalom, jer se neće moći kontrolirati kamo će ići smola nakon što postupak započne. [18]

Ako je potrebna gelna prevlaka pri proizvodnji proizvoda, ona se treba nanijeti i ostaviti da se osuši prije postavljanja slojeva ojačavala. [18] Gelná prevlaka je tanki sloj koji prekriva vanjsku površinu proizvedene tvorevine pružajući površinsku zaštitu materijala te istovremeno osiguravajući zadovoljavajući estetski izgled završnog sloja. U gelnu prevlaku moguće je dodati pigmente tako da se proizvod ne treba naknadno lakirati. Debljina premaza ručnim postupkom je od 0,4 mm do 0,8 mm. [8]

4.2.2. Oblikovanje predoblika

Odabir ojačavala je važna odluka za bilo koji laminat, jer iako će sve tkanine biti impregnirane, različiti materijali i stilovi tkanja mogu jako mijenjati brzinu toka smole. Staklena vlakna su najčešće upotrebljavana ojačavala kod podtlačnog ulijevanja. Većina tkanina od staklenih vlakana nudi visoku propusnost omogućujući lako propuštanje smole. Ugljična i aramidna vlakna također se mogu upotrebiti kod podtlačnog ulijevanja, iako imaju tendenciju da se sporije impregniraju. Kako bi se taj problem riješio, dodaje se materijal za poboljšavanje protoka koji znatno povećava brzinu ulijevanja smole. [11]

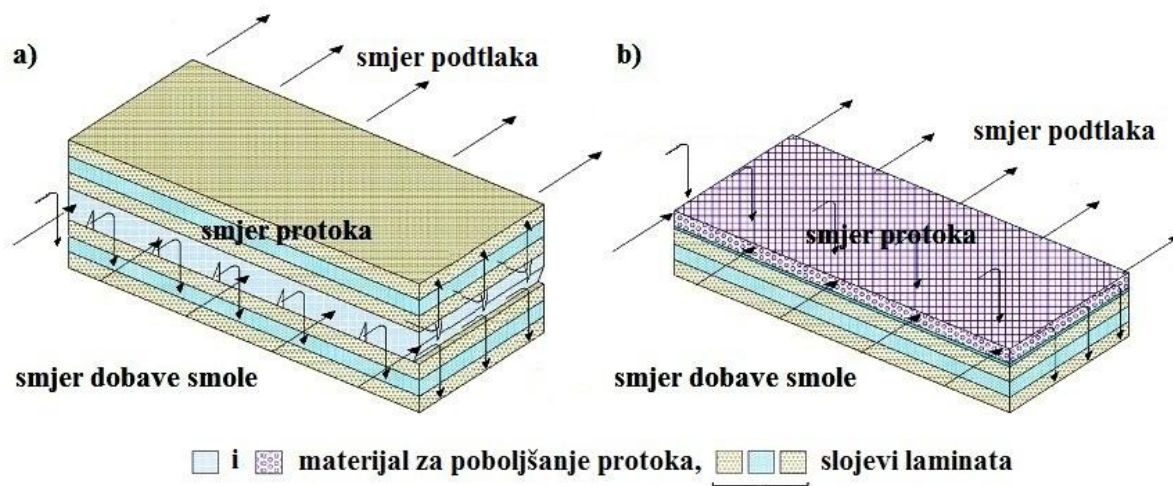
Ojačavala se izrezuju na odgovarajuću veličinu za kalupljenje, a gdje je to moguće, uvijek se pokušava napraviti dio primjenjujući jedan komad tkanine za svaki sloj. Tipični proizvodi sastoje se od 2 do 6 slojeva, premda su 3 sloja često dovoljna za male, lagane dijelove.

Potrebno je paziti da se tkanine odrežu dovoljno velike kako bi se protezale dovoljno izvan svih rubova gdje će kasnije dio biti obrezan. U složenijim kalupima, posebno onim sa strmim stranicama ili višestrukim konturama, ponekad je potrebno primijeniti adhezijski raspršivač za držanje laminata na površini kalupa kao i za držanje sljedećih slojeva ojačavala jednog za drugog. Materijal za poboljšavanje protoka (također poznata kao i infuzijska mreža) primjenjuje se kako bi se osiguralo da smola može slobodno strujati kroz laminat. Oblik materijala omogućuje da čak i pod potpunim podtlakom još uvijek postoje praznine kroz koje smola može teći. [18]

Premda je moguće, rijetko je uspješno impregnirati ojačavalo smolom bez dodavanja sredstava za poboljšavanje protoka zbog pojave suhih mjesta.

Stoga postoje dvije varijante postavljanja sloja infuzijske mreže:

- U slučaju kada se mreža postavlja između slojeva ojačavala, mreža se reže na dimenzije ojačavala jer u konačnici postaje dio laminata (slika 4.5 a)). Mreža za poboljšavanje protoka dolazi u nekoliko tipova, a sličan je tradicionalnim jezgrama premda ima žljebove i perforacije u materijalu jezgre kako bi pomogao smoli u prolazu kroz laminat istovremeno dajući čvrstoću i krutost. [11]



Slika 4.5. Materijal za poboljšavanje protoka: a) između laminata, b) na sloju *peel-ply* [19]

- U slučaju kada se mreža postavlja iznad sloja *peel-ply*, materijal se treba rezati tako da budu iste veličine kao što je ojačavalo / *peel-ply*, osim na krajevima koje treba proširiti, gdje se na materijal postavlja priključak za dovod smole (slika 4.5 b)). Podtlačni priključci ne smiju biti u izravnom kontaktu s materijalom za poboljšavanje protoka kako se smola iz kalupa ne bi izravno izvlačila bez impregnacije ojačavala, ali mora biti dovoljno blizu

kako bi se osiguralo da smola dobro teče unutar kalupa pod podtlakom. U slučaju kada se priključak postavlja neposredno iznad materijala za poboljšavanje protoka, ispod mjesta postavljanja podtlačnog priključka stavlja se preklopljen komad *breather* tkanine (tkanine za upijanje viška smole) kako bi se stvorio jastučić koji će apsorbirati višak smola sprečavajući smolu da bude uvučena u podtlačnu cijev i podtlačnu pumpu. [18]

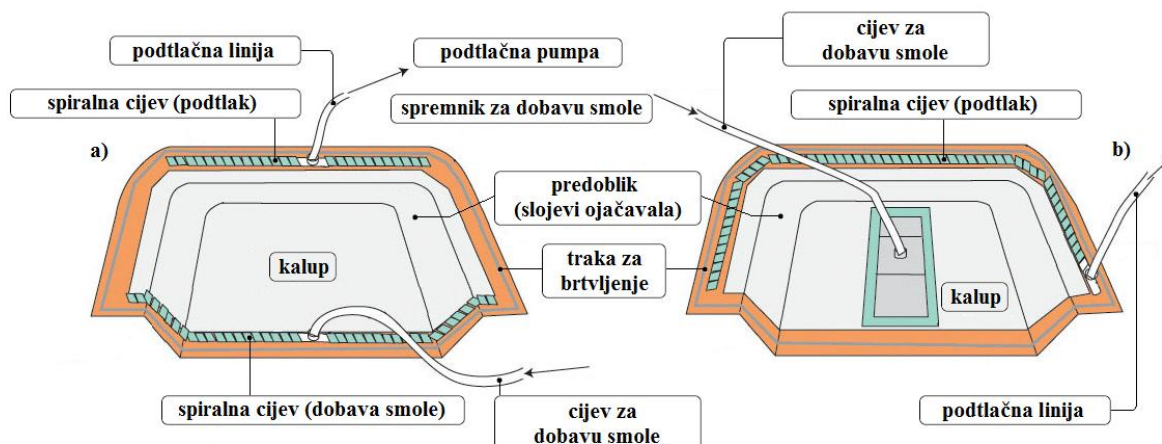
Peel-ply je tanka tkanina koja služi kao prvi odvojivi sloj između kompozitna i folije za brtvljenje odnosno kao uklonjiva barijera koja se odvaja od gotovog proizvoda dajući teksturu površini idealnu za lijepljenje. *Peel-ply* se obično izrezuje samo djelić veća od ojačavala te se stavlja u jednom sloju tako da potpuno pokrije sva područja ojačavala. [18]

4.2.3. Postavljanje spiralnih cijevi

Spiralna cijev je plastična vrpca koja je smotana u oblik cijevi, a zbog njene konstrukcije, zrak ili smola mogu ući ili izaći kroz stijenku cijevi po cijeloj dužinu. [11]

Kod planiranja postavljanja spiralnih cijevi postoje dvije standardne konfiguracije kalupa:

- kada su spiralne cijevi postavljene na obodu kalupa, jedna nasuprot drugoj, tako da se smola brzo raspodijeliti duž jedne strane kalupa, a zatim ravnomjerno napreduje prema drugoj strani. Ovakva konfiguracije najčešće se primjenjuje za duge proizvode (slika 4.6 a)). [18]
- kada se ulijevanje smole vrši iz središnje točke te se spiralna cijev postavlja oko prirubnice kalupa, kako bi se postignulo uvlačenje smole na sve strane kalupa (slika 4.6 b)). Ova konfiguracija najčešće se primjenjuje za manje dijelove zbog manje brzine ulijevanja. [11]



Slika 4.6. Pozicija spiralne cijevi u kalupu: a) jedna nasuprot drugoj, b) uz rub kalupa [11]

Kod postavljanja, neophodno je da spiralna cijev bude izravno iznad ili pored materijala za poboljšavanje protoka kako bi se osiguralo da smola može lako protjecati iz cijevi u materijal. [18] Spiralna cijev prilikom postavljanja ima sklonost da se izravna ili da se pomakne, a najjednostavniji način da se to suzbije jest pričvršćivanjem cijevi malim komadom trake za brtvljenje tako da se traka postavi na cijev, a zatim da se cijev pričvrsti na kalup. Kako bi se nakon umreživanja dijela spiralna cijev lakše uklonila potrebno ju je omotati u *peel-ply*. [11] Zatim je potrebno postaviti priključke linije za dobavu smole i podtlačne linije kojima se omogućuje spajanje cijevi unutar kalupa (ispod folije za brtvljenje) s onima izvan njega.

Priključak za napajanje smolom je silikonski priključak koji na donjoj strani ima jednostruki kanal. Kanal se postavlja na sredinu spiralne cijev što omogućuje da se smola iz spremnika za dobavu smole dovede i ravnomjerno rasporedi u kalupu. [18]

Podtlačni priključak je silikonski priključak koji na donjoj strani ima 3 kanala koja su namijenjena da omoguće slobodan protok zraka od materijala do priključka čak i pod potpunim podtlakom. Podtlačni priključak postavlja se na vrh predoblika blizu materijala za poboljšavanje protoka kako bi se omogućio što bolji protok zraka te kako u njega ne bi izravno ulazila smola iz materijala prilikom impregnacije. [18]

4.2.4. Zatvaranje kalupa folijom za brtvljenje

Zatvaranje kalupa započinje postavljanjem trake za brtvljenje. To je vrsta vrlo ljepljive gumene trake, a primjenjuje se u svim podtlačnim postupcima gdje je njena savitljiva priroda čini vrlo učinkovitom u postizanju brtvljenja. U postupku podtlačnog ulijevanja traka se najčešće postavlja na prirubnicu oko ruba kalupa, pri čemu je kalup donja polovica, a folija za brtvljenje gornja polovica kalupa. Ako to nije moguće, folija se može omotati oko cijelog kalupa, pa se traka nanosi samo na polovicu kalupa.

Jednom kada je traka postavljena, potrebno je izrezati foliju za brtvljenje. Apsolutno je neophodno osigurati dovoljno folije tako da ona uđe u sve oblike i konture kalupa. Svako „premošćivanje“ folije gdje ona ne može izravno pristupiti kutovima kalupa dovest će do nastanka područja bogatih smolom smanjujući čvrstoću i kvalitetu gotovog proizvoda. [18]

Potrebno je izrezati komad folije koji je dovoljno velik da pokrije površinu oko 50 % veću od površine kalupa. [18] Folija bi trebala biti napeta, ali ipak dati dovoljno prostora za sve

materijale, uključujući mreže cijevi. Previše ili premalo folije može rezultirati skupljanjem smole ili nepravilnim ulijevanjem. [11] Počevši od jednog kuta, uklanjanjem dijela papira s trake za brtvljenje potrebno je pritisnuti kut folije za brtvljenje na izloženu traku. Krećući se oko kalupa i uklanjajući polagano papir s trake, na izloženu traku potrebno je postaviti i učvrstiti ostatak folije. Nikako nije dobro ukloniti sav papir s trake jer će to vjerojatno rezultirati hvatanjem folije za traku prije nego je ispravno postavljena i poravnata. Prilikom lijepljenja folije na traku potrebno je obratiti pozornost da nema nabora ili presavijanja folije. Čvrstim pritiskom folije na traku postiže se hermetično brtvljenje. Ako tijekom podtlačne probe dođe do propuštanja zraka vjerojatan uzrok će biti nabor ili presavijanje folije u dodiru s trakom. [18]

4.2.5. Spajanje i postizanje brtvljenja cijevi s kalupom

Kada su svi elementi kompozita zatvoreni ispod folije za brtvljenje, potrebno je spojiti liniju za dobavu smole i podtlačnu liniju, odnosno priključak za napajanje s cijevi za dobavu smole te podtlačni priključak s podtlačnom cijevi.

Koristeći škare ili nož potrebno je napraviti mali rez u foliji neposredno iznad otvora na silikonskom priključku kako bi se omogućilo spajanje cijevi i priključaka. [18]

Cijev za ulijevanje smole mora biti dovoljno duga da se proteže od mjesta na kojem se nalazi spremnik za dobavu smole do silikonskog priključka u kalupu. Poželjno je da se cijev odreže pod kutom (npr. 45°) tako da kada se cijev postavi u kalup ne dođe do slučajnog začepljenja kraja cijevi. Koso odrezani kraj cijevi potrebno je gurnuti kroz malu rupu u foliji i kroz otvor na vrhu priključka za dobavu smole. Postavljenu cijev potrebno je zabrtviti na foliji omatanjem trake za brtvljenje oko mjesta spoja, a kako bi se osigurala nepropusnost brtve potrebno je čvrsto pritisnuti traku na mjestu spoja. [18] Drugi kraj cijevi postavlja se unutar spremnika za dobavu smole tako da dođe sve do dna, a kako ne bi došlo do brtvljenja cijevi s dnom spremnika, kraj cijevi se također mora odrezati pod kutom. Potrebno je poduzeti određene korake kako bi se osiguralo da cijev za dobavu smole ostane u spremniku, jer bi ulaskom zraka u cijev gotova tvorevina sigurno bila uništena. [11]

Potrebno je ponoviti postupak iz prethodnog koraka, tako da druga cijev spaja spremnik za višak smole sa silikonskim podtlačnim priključkom u kalupu. Cijev odrezanu pod kutom potrebno je umetnuti kroz malu rupu izrezanu u foliji u otvor priključka, a nakon postavljanja

cijevi zabrtviti ju na foliju pomoću trake. Drugi kraj podtlačne cijevi potrebno je spojiti na jedan od priključaka spremnika za višak smole. Spremnik za višak smole nalazi se između kalupa i podtlačne pumpe i sprječava da višak smole iz tvorevine bude uvučen u cijev pumpe. Ako je proizvod velik i očekuje se značajan protok smole u podtlačnoj liniji, moguće je postaviti i više spremnika za višak smole. U spremnik se može postaviti posuda tako da se smola koja ulazi u spremniku može lako ukloniti nakon završetka postupka. [18]

Zatim je potrebno pomoću cijevi povezati podtlačnu pumpu s drugim priključkom na spremniku za višak smole. Ta cijev može biti duga koliko je potrebno i neće biti uništena postupkom podtlačnog ulijevanja jer u nju ne smije ući smola što znači da se može ponovno upotrebiti za izradu sljedećeg proizvoda. [18]

4.2.6. Postizanje podtlaka i priprema smole

Cijev za dobavu smole potrebno je zatvoriti kutnim ventilom kako bi se spriječio ulazak zraka u kalup kroz cijev iz spremnika za dobavu smole, te je potrebno uključiti podtlačnu pumpu. Kako se zrak uklanja ispod folije za brtvljenje, folija će se stezati oko površine kalupa. Za vrijeme otklanjanja zraka podtlakom potrebno je podesiti foliju tako da se folija nalazi u području kalupa koji je treba. [18]

Također se može ciklički komprimirati i opuštati predoblik kako bi se bolje sabio tj. kako bi se bolje istisnuo zrak između slojeva ojačavala te kako bi se izravnali nabori folije i uklonila mjesta na kojima je folija „premostila“ utore u kalupu. [7]

U slučaju da je potrebna količina folije premala za brtvljenje kalupa to će se saznati u ovoj fazi jer će folija "premostiti" određene točke kalupa i neće biti moguće premještanjem određenih dijelova folije to popraviti. U slučaju da se to dogodi, postupak se zaustavlja, a folija i traka se skidaju i ponovo postavljaju. Kada bi se postupak nastavio dalje s folijom koja je premala, posljedice bi bile vidljive na gotovom proizvodu. [18]

Potrebno je ponovno uključiti pumpu i završiti izvlačenje zraka iz kalupa. [18] U slučaju da postoje mala propuštanja zraka koje je naizgled nemoguće otkriti moguće se poslužiti neki od ova dva alata: ultrazvučnim detektorom propuštanja ili manje skupim instrumentom, stetoskopom. U slučaju da brtvljenje nije potpuno, potrebno je pritiskati foliju na traku oko kalupa sve dok se ne postigne podtlak odnosno otkrije mjesto propuštanja. [11]

Količina smole koja je potrebna za izradu tvorevina varira ovisno o veličini i količini ojačavala, odnosno za više slojeva ojačavala potrebno je i više smole. Neki proizvođači nude tablice kojima se može procijeniti odnosno izračunati potrebna količina smole za određenu vrstu materijala ojačavala ovisno o veličini izrađivane tvorevine i masi materijala ojačavala. Također je potrebno izračunati odgovarajući omjer smole i umreživala te temeljito izmiješati komponente. Omjer smole i umreživala utječe na raspoloživo vrijeme ulijevanja smole. [18]

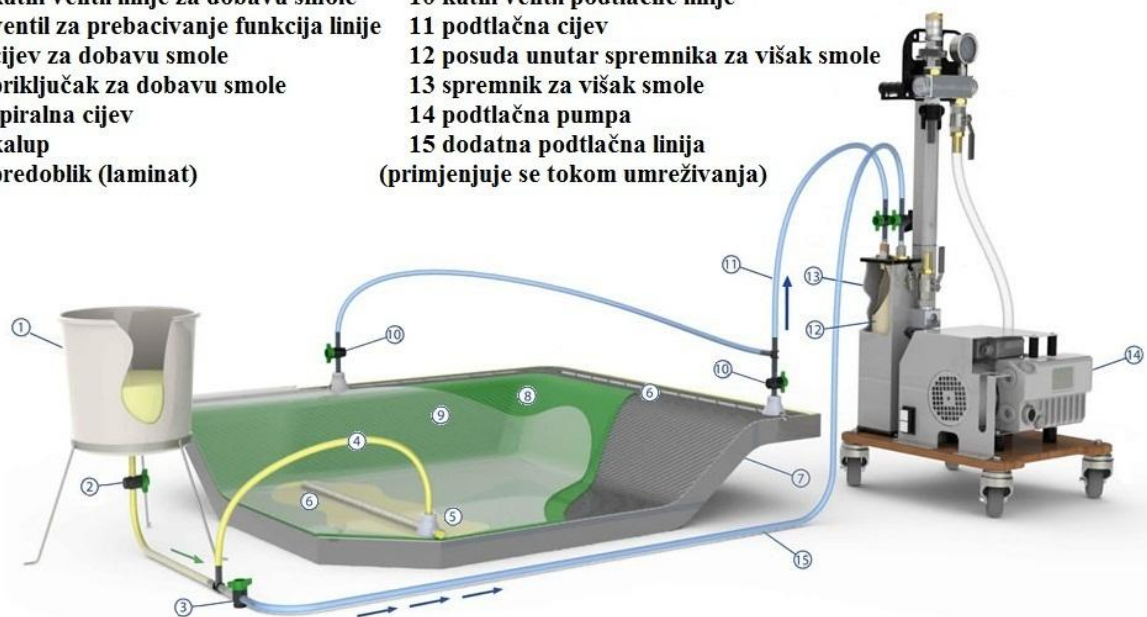
Često se preporučuje da se komponente smole miješaju u posebnoj posudi, a zatim da se izmiješana smola prelije u spremnik za dobavu kako bi se smanjio rizik da dio nepomiješane smole, koji se obično uhvati na stijenkama posude za miješanje, bude uvučena u kalup. [18] Dobro je još jednom provjeriti je li sklop cijevi na spremniku za dobavu smole na mjestu, tako da je kraj cijevi na dnu spremnika i da cijev ne može ispasti iz spremnika. [11]

4.2.7. Podtlačno ulijevanje smole u kalup

Postupak podtlačnog ulijevanja započinje laganim okretanjem kutnog ventila na cijevi za dovod smole, a nakon što je ventil potpuno otvoren, podtlačna pumpa će uvući smolu kroz cijev u kalup. [18] Brzina ulijevanja odnosno uvlačenja smole ovisi o mnogim parametrima, ali smola bi se trebala vidljivo kretati u kalupu. [11]

Ovisno o veličini i obliku tvorevine, položaju spiralne cijevi za dobavu smole i količini upotrebljenog ojačavala, smola će trebati negdje između nekoliko minuta i jednog sata kako bi se cijeli dio impregnirao smolom. [18] Preporučuje se da dio smole ulazi u spremnik za višak smole neko vrijeme kako bi se iz kalupa uklonili sitni mjehurići zraka u prednjem dijelu fronte toka smole. [7] Međutim potrebno je obratiti pozornost da spremnik za dobavu smole ne ostane prazan jer bi tada u kalup ušao zrak, te da u spremniku za višak smole ne bude previše smole jer smola umreživanjem stvara egzotermnu reakciju zbog koje može doći do isparavanja. Na slici 4.7 prikazan je postupak podtlačnog ulijevanja te raspored prethodno opisanih komponenti. [11]

- | | |
|--|---|
| 1 spremnik za dobavu smole | 9 folija za brtvljenje |
| 2 kutni ventil linije za dobavu smole | 10 kutni ventil podtlačne linije |
| 3 ventil za prebacivanje funkcija linije | 11 podtlačna cijev |
| 4 cijev za dobavu smole | 12 posuda unutar spremnika za višak smole |
| 5 priključak za dobavu smole | 13 spremnik za višak smole |
| 6 spiralna cijev | 14 podtlačna pumpa |
| 7 kalup | 15 dodatna podtlačna linija |
| 8 predoblik (laminat) | (primjenjuje se tokom umreživanja) |



Slika 4.7. Komponente postupka podtlačnog ulijevanja [19]

4.2.8. Umreživanje i vadenje kompozita iz kalupa

Kada se cijev za dovod smole zatvori i tvorevina je u potpunosti impregnirana smolom, preostaje samo čekati da se smola umreži. Podtlačna pumpa trebala bi ostati uključena tijekom trajanja ciklusa umreživanja. [18] Podtlak će držati impregniranu tvorevinu čvrsto pritisnutu za kalupu kako bi se dobio kompozit s jednolikom debljinom stijenke tj. jedinstveni kompresijski omjer ili jednolik volumni udio vlakana. [7] Budući da velike količine izmiješane smole na jednom mjestu mogu egzotermno reagirati, potrebno je ukloniti smolu iz spremnika za dobavu smole i nastaviti paziti na smolu u spremniku za višak smole. [18]

Umreživanjem smole pri povišenoj temperaturi može se dramatično skratiti vrijeme umreživanja na samo nekoliko sati i poboljšati temperaturnu toleranciju i čvrstoću gotove tvorevine. U slučaju da se tvorevina umrežuje pri povišenoj temperaturi dok je još u kalupu, potrebno je primijeniti materijale za kalup i odvajalo koji mogu podnijeti povišenu temperaturu. [18]

Kada je tvorevina potpuno umrežena, pumpa se može isključiti, a folija izrezati oko rubova tvorevine i ukloniti zajedno s trakom za brtvljenje. Zatim je potrebno ukloniti podtlačnu liniju i liniju za dobavu smole. Umreženu smolu moguće je smrviti sa silikonskih priključaka, te ih ponovo primijeniti za izradu sljedećeg proizvoda. U slučaju da je potrebno, može se ukloniti i

sloj *peel-ply* s unutrašnje strane kompozita. Nakon toga slijedi uklanjanje tvorevine iz kalupa. Pri vađenju, potrebno je obratiti pozornost da se ne ošteti proizvod ili površina kalupa. [18]

4.3. Prednosti i nedostaci postupka podtlačnog ulijevanja

Postupak podtlačnog ulijevanja izvorno je razvijen za proizvodnju visokokvalitetnih i velikih kompozitnih tvorevina. Postupak koristi razliku tlaka između okolišnog tlaka i podtlaka kako bi se postigli jedinstveni zahtjevi. Prednosti i nedostaci postupka sažeti su u nastavku.

4.3.1. Prednosti podtlačnog ulijevanja

Premda se u postupku podtlačnog ulijevanja primjenjuje kalup sličan kalupu za ručni dodirni postupak, kako bi se kalup lako mogao modificirati za izradu različitih veličina i geometrija tvorevina, pristup izradi dijelova drugačiji je od postupaka u kojima se slojevi ojačavala ručno laminiraju. [7] U postupku podtlačnog ulijevanja, podtlak se postiže dok su materijali još uvijek suhi te se smola zatim uvlači u laminat umjesto da postupak započne s viškom smole koju je potrebno izvući iz laminata. U idealnom slučaju, sva prekomjerna smola koja se uvede bit će u konačnici usisana podtlačnom linijom u spremnik za višak smole. [11]

Kao rezultat toga upotreba smole postaje vrlo predvidiva i konzistentna jer je uvedena samo minimalna količina smole što smanjuje masu, povišuje čvrstoću i povećava svojstva vlakana i smole. Manja količina bačene smole znači i smanjenje troška postupka. [11] Također zbog prozirne plastične folije za brtvljenje lako se mogu uočiti suha mjesta koja se javljaju tijekom postupka ulijevanja smole, te se mogu ukloniti pomoću podtlačne igle izvlačenjem zraka iz suhog mjesta [7].

Podtlačno ulijevanje pruža još jednu vrijednu prednost, a to je vrijeme postavljanja. Postupak podtlačnog ulijevanja nudi neograničeno vrijeme postavljanja slojeva ojačavala i folije budući da se podtlak primjenjuje dok je ojačavalo još uvijek suho, a smola i umreživalo miješaju se neposredno prije ulijevanja. Česti problem koji se može pojaviti kod sličnog postupka kao što je postupak podtlačnog oblikovanja vrećom je nemogućnost pronalaska mjesta propuštanja brtve prije početka umreživanja smole. [11]

Konačno, podtlačno ulijevanje je mnogo čišći postupak pošto se smola ne nanosi ručno na ojačavalo. Osim toga smola se manje isparava budući da je jedini izvor para spremnik za

dobavu smole u kojeg se smola ulijeva neposredno prije impregnacije laminata. Postupak podtlačnog ulijevanja stoga pruža čišći, sigurniji i ugodniji radni okoliš, jer je važno raditi u dobro prozračenom prostoru i nositi prikladnu sigurnosnu opremu. [11]

Ovdje su pobrojane prednosti postupka podtlačnog ulijevanja navedene u prethodnom tekstu:

- fleksibilno oblikovanje alata i odabir kalupnih materijala
- omogućuje proizvodnju velikih i složenih kompozitnih tvorevina
- bolji omjer vlakana i smole
- manji utrošak i vrlo konzistentna upotreba smole
- niski udio praznina u kompozitu (manje od 1 %)
- neograničeno vrijeme postavljanja
- čišći postupak bez isparavanja.

4.3.2. Nedostaci podtlačnog ulijevanja

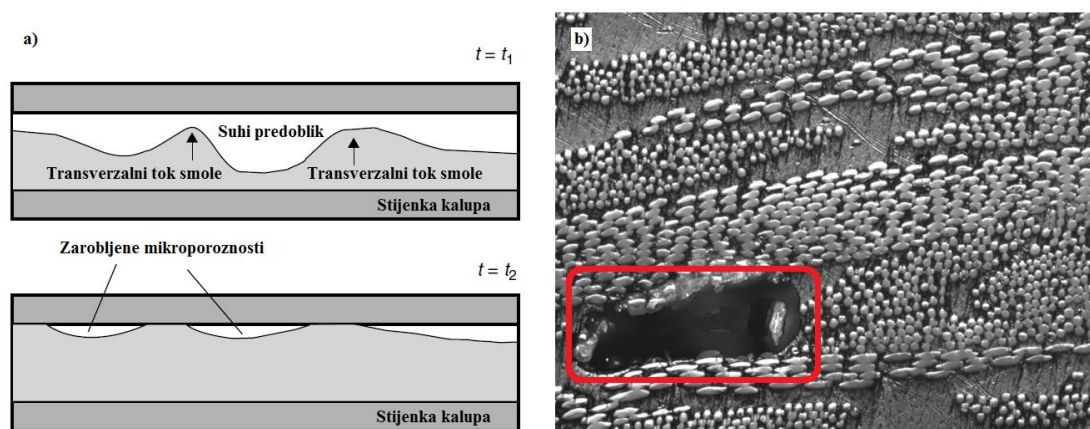
Kao i svaki postupak, postupak podtlačnog ulijevanja ima svoje nedostatke.

Kod postupka podtlačnog ulijevanja teško je odrediti optimalan raspored i položaj svake komponente pošto ne postoji univerzalni način postavljanja komponenata. Ovaj postupak zasniva se na metodi pokušaja i pogreške, stoga je za svaku novu tvorevinu potrebno pažljivo isplanirati postupak ulijevanja koji ovisi o geometriji, kompleksnosti i veličini tvorevine.

Nakon provedene analize potrebno je dokumentirati prikupljene podatke kako bi se u sljedećoj analizi otklonile pogreške ili poboljšali određeni parametri. Kvaliteta izvedbe postupka jako ovisi o vještini i iskustvu radnika te kvaliteti komponenata, a vrlo je jednostavno pogriješiti, što u većini slučajeva znači i da je tvorevine koja se proizvodi uništena. [11]

Vjerojatnost propuštanja zraka je visoka, a propuštanje zraka može uzrokovati suha mjesta i nepotpuno ulijevanje smole. Prije ulijevanja, za vrijeme ulijevanja i za vrijeme umreživanja smole potrebno je pažljivo i često provjeravati pojavljuje li se propuštanje zraka jer mjesta propuštanja zraka mogu nastati u bilo kojem trenutku tijekom ovih triju faza. [7] Nažalost, većina komponenata postupka podtlačnog ulijevanja upotrebljava se jednokratno, stoga se sve analize i probe rade umanjene i s relativno jeftinijim materijalima. [11]

Suho mjesto je područje kompozitne tvorevine koje nije zasićeno smolom. U postupku podtlačnog ulijevanja podtlak unutar predoblika nikada ne može biti stvarno nula. Kao posljedica toga, postoji velika vjerojatnost da će zrak ostati zarobljen unutar kompozitne tvorevine ako se tijekom punjenja kalupa zrak ne može istisnuti pomoću smole (slika 4.8 a)). Jedan od glavnih razloga za stvaranje suhog mjesta je nepravilno oblikovanje punjenja kalupa koje uzrokuje da tok smole dosegne podtlačni priključak prije nego se sav zrak unutar predoblika potpuno istisne smolom. Osim vidljivih suhih točaka, mikrošupljine su još jedna vrsta zarobljenog zraka (slika 4.8 b)). Mikrošupljine nastaju zbog neuskладivog dualnog ponašanja toka smole prilikom procesa natapanja unutar rovinga. [7]

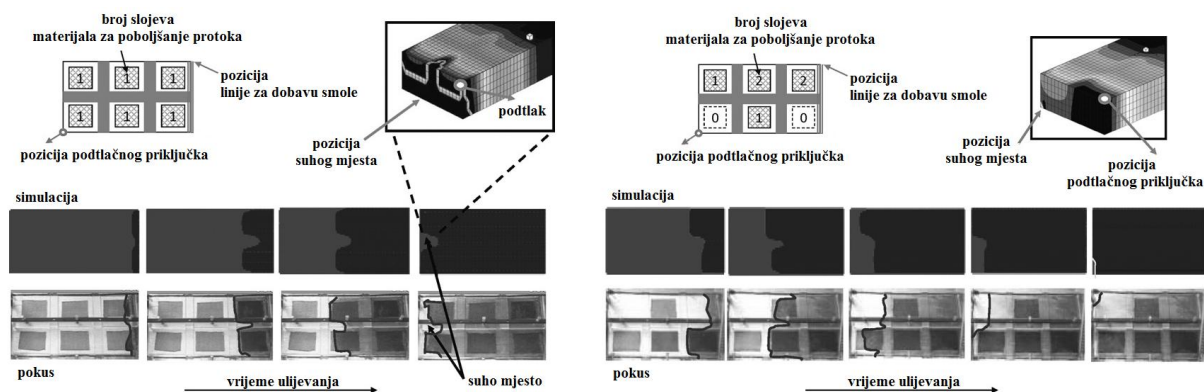


Slika 4.8. Prikaz a) površinskih mikroporoznosti i b) unutrašnjih mikrošupljina [7]

Na slici 4.8 b) prikazan je kompozit načinjen od staklenih E vlakana i poliesterske smole.

Postoje razni pristupi kojima se može otkloniti zaostali zrak u kalupu: [7]

- Prvi pristup je optimizirati punjenje kalupa primjenom algoritama i simulacija punjenja kalupa kako bi se odredio optimalan položaj sloja materijala za poboljšavanje protoka, položaja cijevi i priključaka, ili čak kontroliralo vrijeme otvaranja / zatvaranja linija. Na slici 4.9 prikazana je simulacija izrade rebrastog kompozita.



Slika 4.9. Primjer simulacije punjenja kalupa [7]

U prvom krugu simulacija, na kraju tvorevine pojavljuje se područje suhog laminata. U sljedećem krugu simulacije, autori [7] pokusa približili su se rješenju promijenivši broj slojeva materijala za poboljšavanje protoka kako bi prilagodili tok smole.

- Ako je uzrok stvaranje suhih mjesta sporost postupak ulijevanja, odnosno da smola ne stigne u potpunosti ispuniti kalup prije nego što postane previše viskozna da bi tekla, potrebno je ubrzati tok smole u kalupu. Kako bi se ubrzala brzina ulijevanja mogu se razmotriti sljedeće mogućnosti kao što je primjena više slojeva materijala za poboljšavanje protoka ili postavljanje više priključaka za ulijevanje i izvlačenje zraka. Također se može uzeti u obzir i usporavanje postupka umreživanja smole primjenom manje količine umreživala ili mijenjanjem temperature kalupa.
- Još jedan pristup temelji se na kontroli protoka lokalnim zagrijavanjem smole tijekom faze punjenja kalupa kako bi se smanjila viskoznost smole i lokalno ubrzao protok. Lokalno ubrzanje toka može se iskoristiti za kontrolu kretanja fronte toka smole tijekom postupka punjenja kalupa radi smanjenja suhih mjesta u kompozitnoj tvorevini. Međutim zagrijavanje može lokalno ubrzati reakciju umreživanja smole.

Postupak podtlačnog ulijevanja primjenjuje se za proizvodnju velikih kompozitnih tvorevina međutim neke debelostjene kompozitne tvorevine ne smiju biti proizvedene odjednom zbog potencijalne toplinske razgradnje i problema toplinsko-mehaničkog upravljanja uzrokovanog brzom reakcijom umreživanja duromerne smole. Zbog niske toplinske vodljivosti i visoke reakcijske topline duromerne smole, kao što je poliesterska ili epoksidna smola, središnja temperatura debelostjene kompozitne ploče može narasti na vrlo visoku temperaturu u kratkom vremenu. Takva pojava naziva se toplinski vrh ili pik (e. *thermal spiking*).

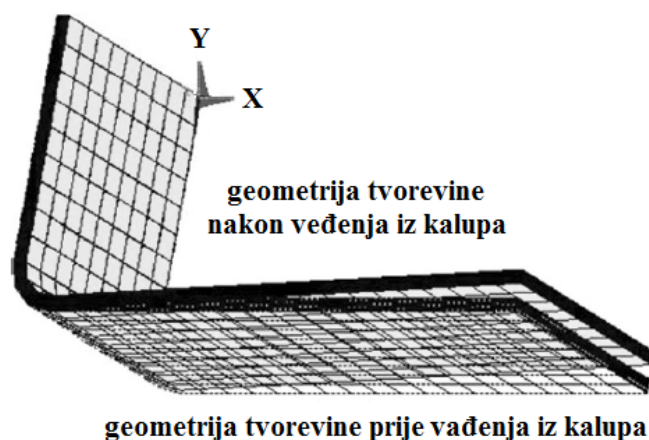
Brzina reakcije duromernih smola eksponencijalno se povisuje s visinom temperature ako je umreživanje smole u ranoj fazi, a kada toplinski vrhovi izmaknu kontroli može doći do toplinske razgradnje smole, nastajanja pukotina zbog toplinskog širenja, deformacija tvorevine zbog neujednačenih toplinsko-mehaničkih svojstava ili čak požara. [7]

Kako bi se izbjegli toplinski vrhovi debelostjene kompozitne tvorevine, postupak višestupanjskog umreživanja (e. *multi-stage curing*, MSC) pomaže izbjegavanju degradacije vezane uz međuslojnu otpornost na lom i smičnu čvrstoću kompozitnih tvorevina. Kod MSC postupka, debelostjena kompozitna tvorevina proizvedena je kroz nekoliko uzastopnih postupaka podtlačnog ulijevanja. U svakoj fazi postupka umreži samo određeni broj slojeva

laminata, te se na njih postavljaju novi set slojeva, nakon čega se postupak podtlačnog ulijevanja ponavlja dok se ne postigne željena debljina kompozitne tvorevine.

Za velike kompozitne tvorevine, kontrola dimenzijskih tolerancija je važna za postupak sastavljanja dijelova i kontrolu zaostalih naprežanja. Konačna debljina kompozita nakon umreživanja može biti različita od debljine odmah nakon postupka relaksacije sabijanja tj. početne faze umreživanja zbog toplinskog stezanja smole tijekom ciklusa umreživanja.

Zaostala naprežanja stvaraju se unutar kompozita tijekom procesa umreživanja zbog neusklađenog toplinskog stezanja polimerne matrice i vlakana. Tijekom procesa umreživanja značajna toplinska stezanja uzrokuju da se kompozit smanji u smjeru debljine, dok s druge strane sustav vlakana, koji ima manju toplinsku vodljivost i mnogo veći modul elastičnosti od smole, pomaže održati dimenzije laminata u smjeru duljine i širine. Ova vrsta neizotropnih dimenzijskih promjena uzrokovat će da se zakrivljeni dio kompozita savine prema unutra nakon što se izvadi iz kalupa. Savijanje tvorevine prema unutra naziva se povrat materijala, a promjena kuta zakrivljene kompozitne tvorevine kut povrata materijala (slika 4.10). [7]



Slika 4.10. Prikaz simulacije povrata materijala [7]

Postoje tri različita pristupa rješavanja problema povrata materijala, premda ih je ponekad potrebno primijeniti sve kada jedan nije dovoljan: [7]

- U slučaju da je moguće predvidjeti kut povrata materijala, potrebno je prepraviti kalup kako bi se kompenzirao kut povrata materijala.
- Dodavanjem nanočestica za smanjenje ekvivalentnog koeficijenta toplinskog širenja matrice moguće je smanjiti kut povrata materijala čime se povećava točnost dimenzija. Dodavanjem veće količine nanočestica u smolu moguće je postići zanemariv otklon kuta.

- Kod debelostjenih tvorevina kut povrat materijala može se smanjiti povećavanjem broja stupnjeva umreživanja. Postupkom višestupanjskog umreživanja pruža se mogućnost da laminat prođe sve faze umreživanja djelomično klizeći po već umreženim slojevima. Djelomično klizanje laminata pomaže smanjenju momenta savijanja s obzirom na neutralnu ravninu zakrivljenog kompozitnog laminata koji uzrokuje povrat kompozitne tvorevine.

Ovdje su pobrojani nedostaci postupka podtlačnog ulijevanja navedeni u prethodnom tekstu:

- komplicirano postavljanje
- metoda pokušaj i pogreška
- jednostavno je uništiti dio
- kvaliteta postupka ovisi o ljudskom faktoru
- jednokratnost komponenata postupka
- zaostali zrak ili džepovi zraka
- stvaranje toplinskih vrhova
- povrat materijala (e. *spring-in*).

4.4. Analiza parametara postupka podtlačnog ulijevanja

Podtlačno ulijevanje uglavnom se primjenjuje za velike tvorevine koji uključuju velike količine materijala i često zahtijevaju dugo vrijeme izrade. Glavni izazov je završiti impregnaciju predoblika prije početka umreživanja odnosno geliranja smole. Drugi izazov je predviđanje konačne debljine tvorevine, koja ovisi o ponašanju materijala pri sabijanju i fleksibilnoj prirodi folije za brtvljenje povezanoj s različitim tlakovima unutar kalupne šupljine. Ovi izazovi pokazuju da postupak nije u potpunosti definiran i ukazuje na potrebu dodatnih informacija o učincima različitih parametara postupka.

Temeljito poznavanje postupka podtlačnog ulijevanja zahtijeva potpuno razumijevanje različitih parametara uključenih u postupak kao što su: sabijenost i propusnost ojačavala, strategija impregnacije ojačavala te položaj sloja materijala za poboljšanje protoka smole. [17]

4.4.1. Sabijenost ojačavala

Sabijenost ojačavala ima utjecaj na postupak ulijevanja smole zbog promjene debljine, poroznosti i propusnosti laminata. Međutim utjecaj sabijenosti na varijaciju konačne debljine

umrežene tvorevine ne mora biti značajan ako se predobliku da dovoljno vremena za relaksaciju kako bi se tlak sabijanja mogao ravnomjerno rasporediti unutar folije za brtvljenje što se postiže zatvaranjem svih priključaka za dobavu smole. Budući da smola ne ulazi u sustav poroznog materijala tj. laminat, gradijent tlaka unutar laminata polako će postati ujednačen prema Darcyjevom zakonu. Što je duže vrijeme između završetka ulijevanja i točke geliranja smole, omogućit će se potpuniji proces opuštanja i stvaranja ujednačenije tvorevine. Primjena više podtlačnih linija ili prebacivanjem linije za dobavu smole u podtlačne linije nakon završetka impregnacije laminata može se ubrzati proces relaksacije sabijanja. [7]

Na slici 4.7 prikazan je ventil br. 3 na liniji za dobavu smole kojim je moguće zatvoriti dobavu smole kako bi se linija mogla upotrebiti kao dodatna podtlačna linija. [7]

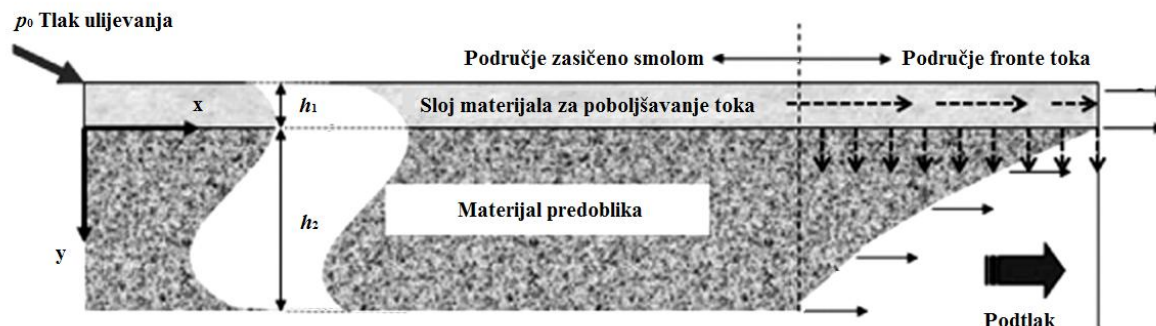
Gore navedene tvrdnje potvrđuju provedeni pokusi čiji rezultati za različit raspored ojačavala pokazuju da za manji tlak sabijanja (≤ 1 bar), niti broj slojeva niti redoslijed slaganje nemaju značajan utjecaj na ponašanje sabijanja. Kada primijenjeni tlak dosegne 1 bar i podtlačna pumpa se zaustavi, opaža se pad primijenjenog tlaka zbog preraspoređivati vlakana u kapulu. Kako bi se postigao ciljani volumni udio vlakana potrebno je predoblik dulje vrijeme držati pod podtlakom prije početka ulijevanja što će omogućiti relaksaciju folije i predoblika tijekom ulijevanja smole. Mijenjanjem rasporeda slojeva ojačavala uz duže vrijeme držanja predoblika pod podtlakom postiže se još veći volumni udio vlakana što je u skladu s hipotezom interakcije između strujanja smole i relaksacije materijala ojačavala. [17]

4.4.2. Propusnost ojačavala [17]

Osim ponašanja pri sabijanju, propusnost je važan parametar ojačavala tijekom postupka podtlačnog ulijevanja. Propusnost je pokazatelj relativne lakoće kojom fluid prolazi kroz prostor pora materijala. Propusnost karakterizira specifična svojstva poroznog medija kao što su oblik i orijentacija čvrstih vlakana, površina izložena fluidu i raspon veličina pora.

Model koji se najčešće primjenjuje za efektivnu propusnost višeslojnog laminata je ponderirana prosječna shema ali ne uzima u obzir poprečni protok, tj. efekt koji se javlja kada smola brže struji kroz jedan sloj od drugog i stvara protok koji se odvija u smjeru debljine. Kod podtlačnog ulijevanja uobičajeno se dodaje sloj materijala za poboljšanje protoka u laminat kako bi se skratilo vrijeme popunjavanja, međutim taj sloj povećava konačnu debljinu

laminata i utječe na propusnost. Uz prisutnost sloja za poboljšanje protoka, konačna impregnacija slojeva laminata odvija se uglavnom kroz debljinu (slika 4.11).



Slika 4.11. Raspored toka smole kroz debljinu predoblika [7]

Sa slike 4.11 vidljivo je da je smola impregnirala sloj materijala za poboljšavanje protoka te da polako prodire kroz slojeve ojačavala u smjeru debljine (na slici označena sa h_2). Također dodatna poteškoća proizlazi iz fleksibilne prirode folije koja uzrokuje promjenu u volumnom udjelu vlakna stoga više nije moguće primijeniti postojeći simulacijski model koji podrazumijeva i konstantni volumni udio vlakana.

U provedenim pokusima protoka ustanovljeno je da se povećavanjem broja slojeva tkanina laminata smanjuje propusnost zbog blokirajućeg učinka na dodirnoj plohi između dviju susjednih tkanina nastalog zbog krivudavog puta toka smole. Također različiti raspored slaganja slojeva tkanina rezultira različitom propusnosti. Prema rezultatima provedenih pokusa postoje dva moguća razloga za utjecaj redoslijeda slaganja na propusnost. Prva mogućnost je da ojačavala s različitim redoslijedom slaganja imaju različitu sabitost, što rezultira različitim propusnostima. Druga mogućnost je da postoji dodirna površina između različitih tipova tkanina, gdje svojstva protoka nisu ista kao u susjednim slojevima.

4.4.3. Strategija impregnacije ojačavala [17]

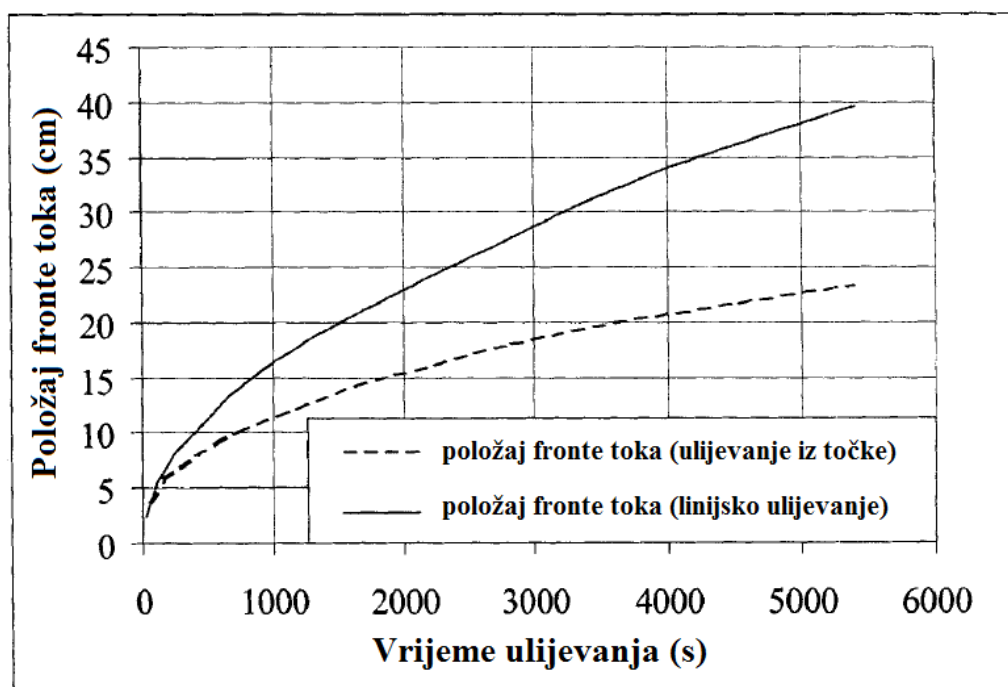
Kod podtlačnog ulijevanja glavna briga, osobito kada je riječ o velikim tvorevinama, je kako dovršiti ulijevanje smole u kalupnu šuplinu u najkraćem vremenu. Ovisno o upotrebnoj strategiji impregnacije ojačavala, mogu se javiti i dodatni troškovi proizvodnje.

U ovom radu uspoređene su dvije strategije ulijevanja prikazane slikom 4.6: ulijevanje iz točke i linijsko ulijevanje. Svaka od navedenih postupaka ima neke prednosti i nedostatke.

Kod ulijevanjem iz točke pojava propuštanja i njezin učinak na vrijeme punjenja i konačnu tvorevinu je smanjen, budući da se zrak uvijek izvlači iz unutrašnjosti kalupne šupljine. Osim toga, nije potrebna dodatna operacija obrezivanja, što smanjuje troškove proizvodnje i omogućuje proizvodnju gotovih dijelova. Međutim, ovaj postupak uvijek je povezan s dužim vremenima ulijevanja, stoga se češće primjenjuje kod proizvodnje manjih proizvoda.

U slučaju linijskog ili rubnog ulijevanja, može se očekivati da se faza ulijevanja završi u kraćem vremenu. No izbjegavanje propuštanja zraka i pozicioniranje priključka nije lagan zadatak, pogotovo kod razgranatih tvorevina. Osim toga, potrebno je obrezati gotovu tvorevinu što povećava iznos troška proizvodnje.

Za svaku strategiju ulijevanja proveden je pokus u kojem je primijenjen isti broj slojeva ojačavala, a dobiveni rezultati položaja fronte toka smole prikazani su na slici 4.12.



Slika 4.12. Ovisnost položaja fronte toka o načinu postavljanja linije za dobavu smole [17]

Iz slike 4.12 moguće je iščitati da je linijsko ulijevanje dva puta brže od ulijevanja iz točke, naročito kada se primjenjuje spiralna cijev kao kanal za dobavu smole. Razlika između dva postupka jasno pokazuje utjecaj fleksibilnosti folije na fazu impregnacije.

4.4.4. Položaj sloja materijala za poboljšanje protoka smole [17]

Materijali za poboljšavanje protoka smole relativno su nedavno razvijeni, s ciljem poboljšanja impregnacijskih svojstava laminata. Dostupni materijali za poboljšanje protoka smole nude niz prednosti nad ostalim orijentiranim tkaninama, naročito smanjujući vrijeme ulijevanja što omogućuje proizvodnju relativno velikih tvorevina s velikim volumnim udjelom vlakana.

Glavni nedostatak ovih materijala je potencijalno smanjenje mehaničkih svojstava uzrokovano manjom ujednačenosti raspodjele vlakana.

Kod postupaka podtlačnog ulijevanja upotreba sloja za poboljšanje protoka smole je kritična, jer pomaže dovršiti ulijevanje u razumnom vremenu. Postoje dva pristupa postavljanja sloja materijala za poboljšavanje protoka smole (slika 4.5). Kod SCRIMP postupka sloj se postavlja iznad sloja *peel-ply* te se nakon izrade proizvoda uklanja, dok se kod drugog postupka sloj postavlja između slojeva ojačavala i nakon postupka izrade postaje dio kompozita. Premda način postavljanja sloja kod drugog postupka izgleda kao bolji izbor jer pomaže u postizanju potrebne debljine kompozita smanjenjem količine potrošnih slojeva ojačavala, glavni nedostatak tog postupka je značajno smanjenje mehaničkih svojstava.

Budući da su to relativno novi materijali mnogi problemi kao što je mijenjanje propusnosti predoblika, stvaranje suhih mjesta, utjecanje na sabijanje laminata itd. ostaju neriješeni, stoga su potrebna daljnja istraživanja kako bi se procijenio njihov utjecaj na svojstva kompozita.

4.5. Ispitivanje mehaničkih svojstava kompozita izrađenih postupkom VIP

U nastavku teksta prikazana su dva ispitivanja mehaničkih svojstava na temelju čijih rezultata su vidljive prednosti postupka podtlačnog ulijevanja ali i osjetljivost svojstava kompozitne tvorevine, izrađene tim postupkom, koja ovise o redoslijedu i vrsti tkanine primijenjenoj za njenu izradu.

4.5.1. Utjecaj vrste proizvodnog postupka na mehanička svojstva kompozitne tvorevine [20]

Uobičajeni postupci izrade polimernog kompozita odnosno polimera ojačanog vlaknima uključuju postupak ručnog laminiranja, podtlačno ulijevanje, namatanje filamenata ili postupak RTM. Ručno laminiranje je postupak s malim ulaganjima u alate te uspješno

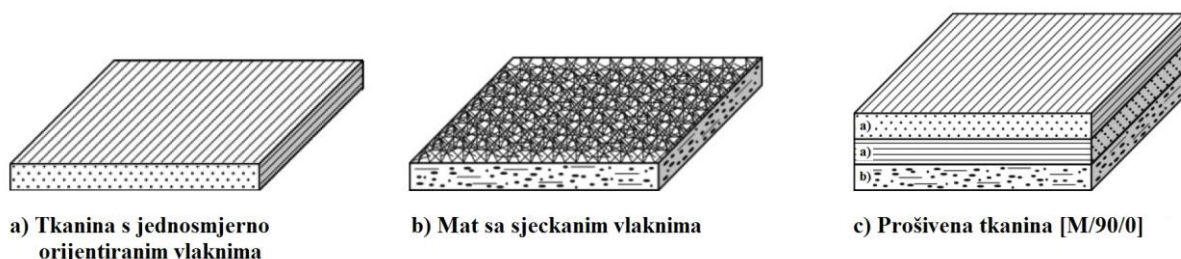
konkurira postupcima kao što su postupak podtlačnog ulijevanja ili postupku RTMa koji zahtijevaju skuplje alate. Ipak postupak podtlačnog ulijevanja koji primjenjuje podtlak kako bi uvukao smolu u laminat više se upotrebljava zbog mogućnosti izrade velikih kompozitnih konstrukcija s visokim mehaničkim svojstvima. Također kao što je već ranije spomenuto postupak izrade kompozita ima veliki utjecaj na konačna mehanička svojstva tvorevine.

U ovom ispitivanju ispitana su mehanička svojstva i mehanizmi loma kompozitnih tvorevina izrađenih postupkom ručnog laminiranja i podtlačnog ulijevanja, te kombinacijom obaju postupaka kako bi se proizveo hibridni kompozit. Hibridni kompozit sastoji se od dva sloja, vanjskog sloja izrađenog postupkom ručnog laminiranja na kojeg se nakon njegovog umreživanja oblikuje unutarnji sloj postupkom podtlačnog ulijevanja. Vanjski sloj oblikovan ručnim laminiranjem posjeduje dobru žilavost što ga čini otpornim na udarna ili lokalna opterećenja, dok unutarnji sloj oblikovan podtlačnim ulijevanjem osigurava visoku čvrstoću i krutost zbog visokog udjela vlakana.

U ovom radu ispitana su rastezna, pritisna i smična svojstva. Svi ispitani uzorci odabrani su iz tri različite proizvodne serije.

4.5.1.1. Materijali za izradu uzoraka i postupci preradbe

Upotrebljeni materijal je prošivena tkanina [M/90/0] koja se sastoji od 3 sloja tkanina. Prvi sloj čini mat sa sjeckanim vlaknima (CSM), drugi sloj tkanina s jednosmjernim vlaknima pod kutom od 90° i treći sloj tkanina s jednosmjernim vlaknima pod kutom od 0° . Na slici 4.13 shematski je prikazana prošivena tkanina [M/90/0].



Slika 4.13. Shema prošivene tkanine [M/90/0] [20]

Kod postupka ručnog laminiranja prošivena tkanina je postavljena na površinu kalupa te je ravnomjerno natopljena smolom. Zarobljeni zrak je zatim uklonjen kistom i valjcima. Za postupak podtlačnog ulijevanja prošivena tkanina postavljena je na već umreženi sloj

tvorevine te je zatvorena folijom za brtvljenje. Nakon postizanja podtlaka u kalup je puštena smola. Umreživanje se u oba postupka odvijalo pri sobnoj temperaturi.

U tablici 4.1 nalaze se svi podaci vezani uz materijale i primijenjene postupke za izradu uzoraka koji su ispitani u ovom ispitivanju. U prvom stupcu naveden je postupak izrade kompozitne tvorevine. U drugom stupcu navedena je oznaka tkanine odnosno vrsta tkanine koja se koristi. U trećem stupcu naveden je broj primijenjenih slojeva materijala. U četvrtom stupcu navedena je redoslijed slaganja slojeva materijala. U petom stupcu navedena je vrsta primijenjenih staklenih vlakana. Za postupak ručnog laminiranja primijenjena su E staklena vlakna *Owens Corning CDM 2408* dok su za postupak podtlačnog ulijevanja E staklena vlakna *Vectorply E-LTM 3610*. U oba slučaja staklena vlakna za izradu mata sa sjeckanim vlaknima su *Vectorply E-M 0015*. U šestom stupcu navedena je vrsta smola koja se upotrebljava u postupku izrade. U ovom ispitivanju upotrebljene su dvije smole zbog razlika u vremenima izvođenja postupaka odnosno vremenima umreživanja, tako da je za postupak ručnog laminiranja upotrebljena epoksid vinil-esterska smola *Reichhold Hydrex 100*, a za postupak podtlačnog ulijevanja *Derakane Momentum 411-200*. U sedmom stupcu prikazana je ukupna debljina tvorevine odnosno uzorka nakon izrade.

Tablica 4.1. Podaci o materijalima i postupku izrade uzoraka [20]

Postupak izrade	Oznaka	Br. slojeva	Redoslijed slaganja	Vrsta vlakana	Vrsta matrice	Debljina h , [mm]		
ručno laminiranje	HL	15	[M/90/0] ₅	M/H	β	Serija		
						1	2	3
						6,56	6,41	6,45
podtlačno ulijevanje	VI	6	[M/90/0] ₂	M/V	α	Serija		
						1	2	3
						2,16	2,40	2,46

H = E staklena vlakna *Owens Corning CDM 2408*

V = E staklena vlakna *Vectorply E-LTM 3610*

M = E staklena vlakna *Vectorply E-M 0015*

α = epoksid vinil-esterska smola *Derakane Momentum 411-200*

β = epoksid vinil-esterska smola *Reichhold Hydrex 100*

U ovom ispitivanju uzorci kompozita su uzeti iz tri različite serije, odnosno serije 1, 2 i 3. Kao što je prikazano u tablici 4.1, vrijednosti debljine za isti uzorak su različite po serijama premda su upotrebljeni jednaki materijali i parametri izrade.

Novi hibridni kompoziti su izrađeni kombinacijom postupaka ručnog laminiranja i podtlačnog ulijevanja. Kako bi se postigla bolja žilavost odnosno otpornost na udarce vanjskih slojeva u postupku ručnog laminiranja upotrebljene su dvije prošivene tkanine [M/90/0] zajedno s dva mata sa sjeckanim vlaknima, te je zatim postupkom podtlačnog ulijevanja dodan sloj prošivenih tkanina [M/90/0].

Tablica 4.2 daje detaljan opis tri ispitna uzorka koja su ispitana. HYB-1 uzorak za sve tri serije ima samo jedan dodani sloj prošivene tkanine postupkom podtlačnog ulijevanja. HYB-2 uzorak za sve tri serije ima dva dodana sloja prošivene tkanine postupkom podtlačnog ulijevanja, dok HYB-3 uzorak ima dodana tri sloja prošivene tkanine postupkom podtlačnog ulijevanja samo za uzorke iz serije 3. Prosječna debljina uzorka HYB povećava se s brojem dodanih slojeva prošivene tkanine postupkom podtlačnog ulijevanja.

Tablica 4.2. Podaci o materijalima i postupku izrade hibridnih uzoraka [20]

Postupak izrade	Oznaka	Br. slojeva	Redoslijed slaganja	Vrsta vlakana	Vrsta matrice	Debljina h , [mm]		
ručno laminiranje + podtlačno ulijevanje	HYB-1	11	$[M/(M/90/0)_2]_{HL}$ + $[(M/90/0)_1]_{VI}$	M/H za HL M/V za VI	B za HL α za VI	Serija		
						1	2	3
						5,90	6,90	6,00
	HYB-2	14	$[M_2/(M/90/0)_2]_{HL}$ + $[(M/90/0)_2]_{VI}$			Serija		
						1	2	3
						6,90	7,80	6,40
	HYB-3	17	$[M_2/(M/90/0)_2]_{HL}$ + $[(M/90/0)_3]_{VI}$			Serija		
								3
								7,70

H = E staklena vlakna *Owens Corning CDM 2408*

V = E staklena vlakna *Vectorply E-LTM 3610*

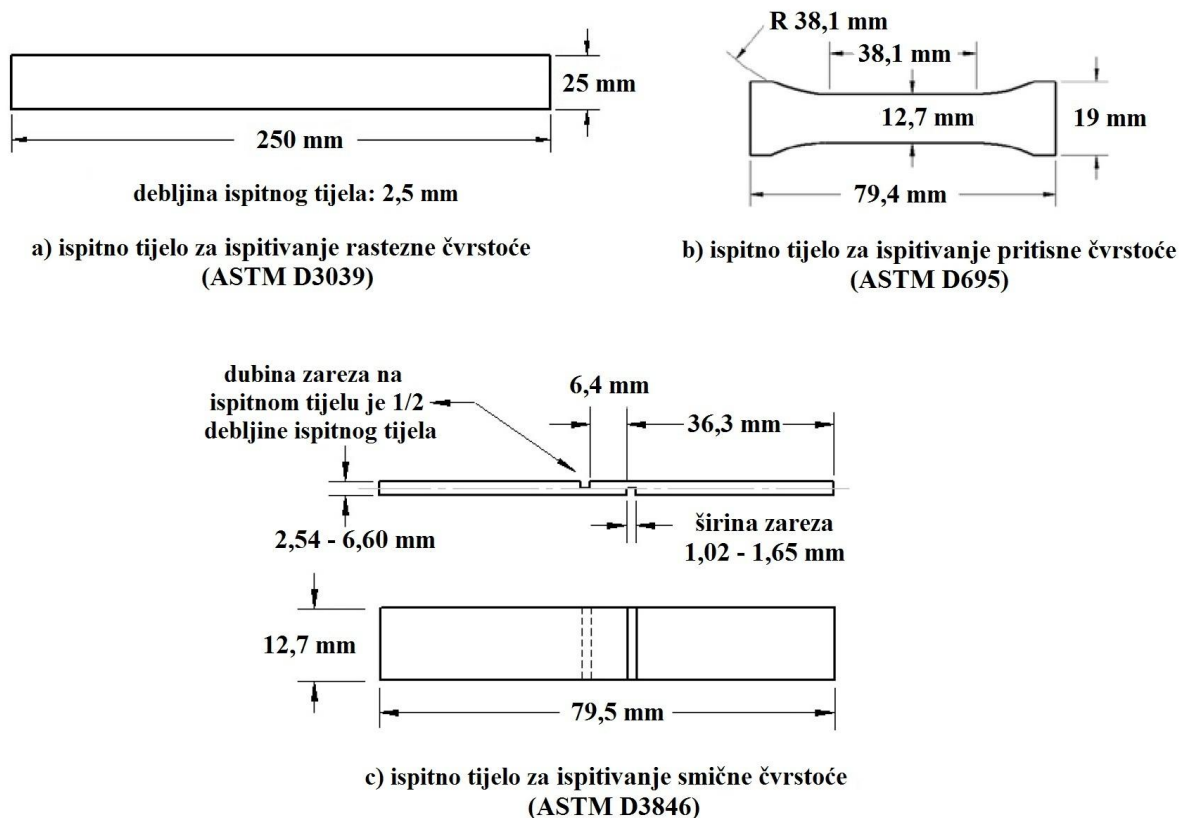
M = E staklena vlakna *Vectorply E-M 0015*

α = epoksid vinil-esterska smola *Derakane Momentum 411-200*

β = epoksid vinil-esterska smola *Reichhold Hydrex 100*

4.5.1.2. Postupci ispitivanja

Na svim uzorcima navedenim u tablicama 4.1 i 4.2 provedeno je ispitivanje rastezne, pritisne i smične čvrstoće. Ispitivanje mehaničkih svojstava provedeno je na univerzalnom uređaju za ispitivanje (*Model 4482, Instron, SAD*), a na slici 4.14 shematski su prikazani oblici ispitnih tijela za gore navedena ispitivanja.



Slika 4.14. Dimenzije ispitnih tijela za ispitivanje mehaničkih svojstava [20]

Rastezna svojstva kao što su modul elastičnosti, rastezna čvrstoća i prekidna čvrstoća određeni su prema normi ASTM D3039. Ekstenzometar (*Instron 2630-100*) je primijenjen za mjerenje istezanja s konstantnom brzinom gibanja od 2 mm/min.

Pritisna svojstva određena su statičkim pritiskim ispitivanjem prema normi ASTM D695. Opterećenje ispitnih tijela vršilo se konstantnom brzinom od 1,3 mm/min.

Smična čvrstoća određena je primjenom tlačnog opterećenja na zarezanom ispitnom tijelu jednolike interlaminarne širine prema normi ASTM D3846. Ispitna tijela su opterećena brzinom od 1,3 mm/min. Smična čvrstoća izračunata je kao omjer najvišeg smičnog opterećenja i umnoška širine ispitnog tijela i duljine područja loma.

Kako bi se zadovoljili uvjeti ispitivanja prema normi ASTM, za svaki uzorak u svakoj seriji ispitano je 5 ispitnih tijela. Ukupno je ispitano 380 ispitnih tijela za pet različitih tipova kompozita proizvedenih u tri serije.

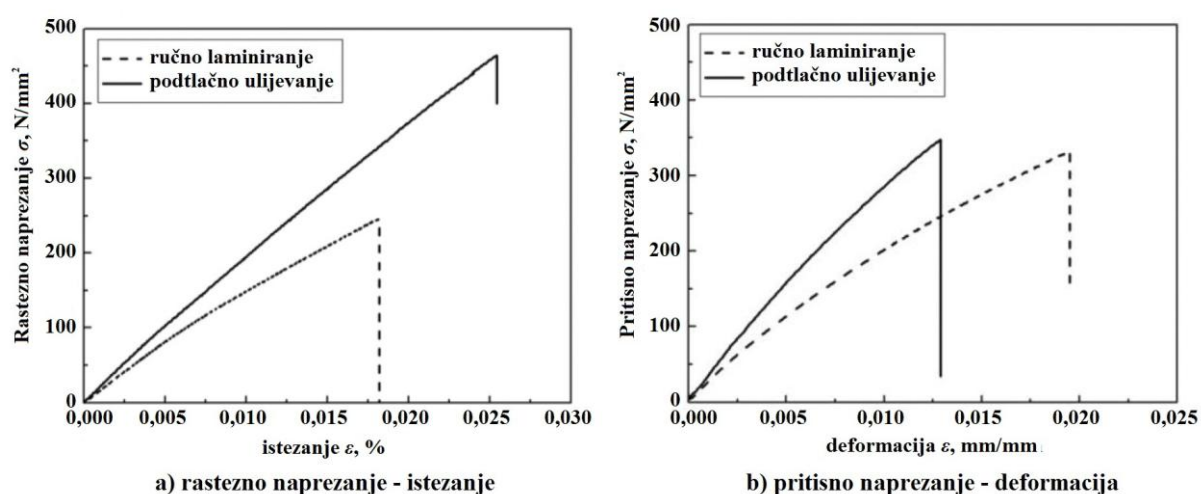
4.5.1.3. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava

Tablica 4.3 prikazuje prosječnu postotnu vrijednosti masenog udjela vlakana u tvorevini (wt%) prema normi ASTM D2584 za uzorke izrađene postupkom ručnog laminiranja i podtlačnog ulijevanja iz tri serije. Prosječne postotne vrijednosti masenog udjela vlakana u tvorevini za uzorke izrađene ručnim laminiranjem kreću se od 53,4 do 54,6, dok se vrijednosti za uzorke izrađene podtlačnim ulijevanjem kreću od 70,3 do 72,6. Iz tih podataka može se zaključiti da se kod postupka podtlačnog ulijevanja smanjio sadržaj praznina i količina smole potrebne za potpuno natapanje vlakana, odnosno podtlak u postupku jače sabija vlakna ostvarujući tanji presjek i bolju čvrstoću po jedinici volumena.

Tablica 4.3. Maseni udio vlakana za uzorke HL i VI [20]

Maseni udio vlakana wt%						
HL	Serija			VI	Serija	
	1	2	3		1	2
	54,00	53,40	54,56		72,60	70,30

Ispitivanje rastezne i pritisne čvrstoće provedeno je na ispitnim tijelima izrađenim ručnim laminiranjem i podtlačnim ulijevanjem te su dobivene karakteristične krivulje naprezanje – istezanje za svaki uzorak (slika 4.15). Na kraju je za vrijednosti 5 ispitanih tijela u 3 serije uzeta prosječna vrijednost čvrstoće (R_m) i modula (E) te su vrijednosti prikazane tablicom 4.4.

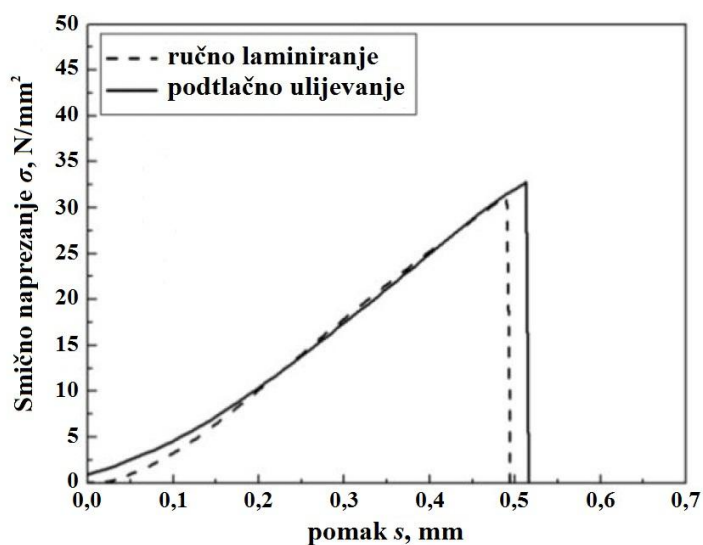
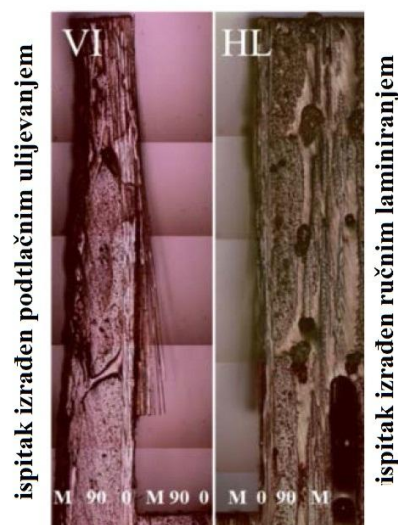


Slika 4.15. Dijagram a) rastezno naprezanje – istezanje, b) pritisno naprezanje – deformacija [20]

Tablica 4.4. Rastezna i pritiska svojstva za uzorke HL i VI [20]

	HL			VI		
	Serija			Serija		
	1	2	3	1	2	3
Rastezna čvrstoća, R_m [N/mm ²]	249,80	299,50	282,30	433,00	430,90	420,20
Modul rasteznosti, E_r [kN/mm ²]	13,80	13,50	13,00	17,70	18,80	16,70
Pritisna čvrstoća, σ_{cm} [N/mm ²]	360,00	298,80	307,40	306,00	338,00	328,50
Modul pritسنosti, E_c [kN/mm ²]	17,70	18,10	18,46	26,10	25,80	25,70

Ispitno tijelo izrađeno podtlačnim ulijevanje pokazuje višu prekidnu čvrstoću (R_p) i krutost od ispitnog tijela izrađenog ručnim laminiranjem zbog razlike u masenom udjelu vlakana koja iznosi oko 17 %, te zbog zaostalog zraka koji je primijećen kod ispitnih tijela izrađenih ručnim laminiranjem. Zaostali zrak u tvorevini uzrokovat će lom ispitnog tijela pri nižim vrijednostima opterećenja. Ispitno tijelo izrađeno podtlačnim ulijevanjem ima bolju pritisku prekidnu čvrstoću (σ_B) i modul pritسنosti (E_c), dok ispitno tijelo izrađeno ručnim laminiranjem pokazuje veći postotak deformacije kod loma ispitnog tijela. Međutim odstupanje pritسنne prekidne čvrstoće između ispitnih tijela je prosječno samo 16 N/mm² što može biti uzrokovano svojstvom vinil - esterske smole koja ima približno 48 % višu pritسنu čvrstoću od rastezne čvrstoće. Stoga ispitno tijelo izrađeno ručnim laminiranjem s visokim udjelom smole pokazuje slična svojstva pritسنne čvrstoće u usporedbi s ispitnim tijelom izrađenim podtlačnim ulijevanjem.

**a) smično naprezanje - pomak****b) ispitno tijelo za ispitivanje smične čvrstoće****Slika 4.16. Prikaz a) dijagrama smičnog naprezanja, b) ispitak VI i HL nakon ispitivanja [20]**

Slika 4.16 prikazuje rezultate ispitivanja smične čvrstoće. Kao što je prikazano na slici 4.16 a), tipične krivulje smicanja za ispitna tijela oba postupka su gotovo identične. Razlog tome je što smično naprezanje uglavnom ovisi o svojstvima veze vlakno – matica. Budući da proizvodni postupak značajno ne utječe na čvrstoću veze vlakno – matrica, postoji mala razlika u čvrstoći između ispitnih tijela izrađenih različitim postupcima. Kao što je prikazano u tablici 4.1, materijali matrica za postupak ručnog laminiranja i podtlačnog ulijevanja imaju vrlo slična svojstva. Na slici 4.16 b) lom ispitnih tijela je gotovo identičan što ukazuje da je kod oba ispitna tijela došlo do pucanja matrice između vlakana. Lom se pruža uzduž osi ispitnog tijela odnosno uzduž vlakana pod kutom od 0° . Smična čvrstoća za ispitno tijelo izrađeno ručnim laminiranjem je $30,5 \text{ N/mm}^2$, a za ispitno tijelo izrađeno podtlačnim ulijevanjem je $36,5 \text{ N/mm}^2$.

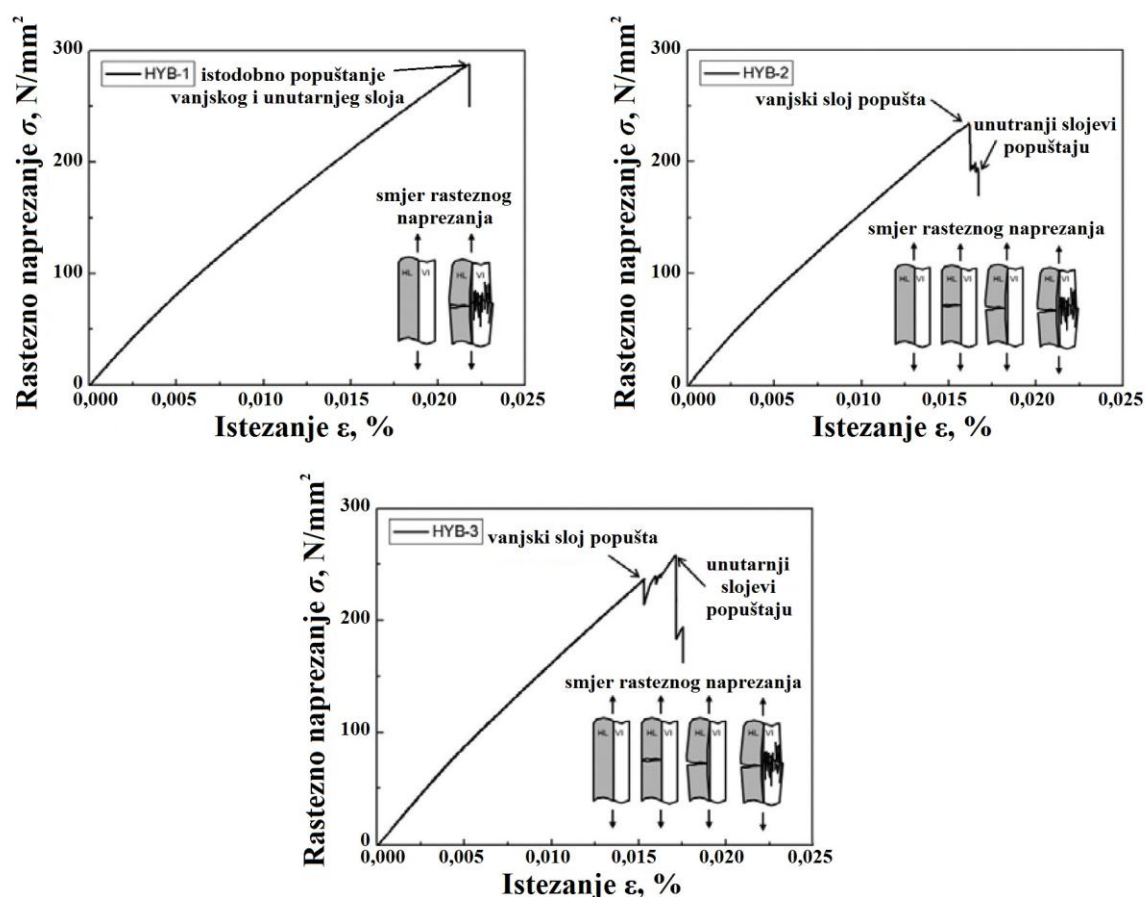
Tablica 4.5 prikazuje prosječnu postotnu vrijednost masenog udjela vlakana u tvorevini (wt%) prema normi ASTM D2584 za uzorke HYB iz tri različite serije. Prosječne postotne vrijednosti masenog udjela vlakna za uzorak HYB-1 kreću se od 53,0 do 56,2, dok se vrijednosti za uzorak HYB-2 kreću od 54,3 do 58,3. Kod uzorka HYB-3, pošto je uzeta samo jedna serija, vrijednost prosječnog postotnog masenog udjela je 59,1. Iz tabličnih podataka može se zaključiti da maseni udio vlakana raste s brojem dodanih slojeva materijala.

Tablica 4.5. Maseni udio vlakna za uzorke HYB [20]

Maseni udio vlakana wt%									
HYB-1	Serija			HYB-2	Serija			HYB-3	Serija
	1	2	3		1	2	3		3
	56,20	54,00	53,00		58,30	58,30	54,30		59,10

Slika 4.17 prikazuje rezultate ispitivanja rastezne čvrstoće hibridnih uzoraka HYB-1, HYB-2 i HYB-3. Istodobno pucanje slojeva izrađenih postupkom ručnog laminiranja i podtlačnog ulijevanja zabilježeno je kod ispitnog tijela HYB-1 (slika 4.17 a)), odnosno nije bilo moguće utvrditi koji je sloj prvi popustio. Na slici 4.17 b) prikazana je tipična krivulja pri ispitivanju rastezanjem do pojave prvog vrha i naglog pada krivulje uzrokovanog lomom vanjskog sloja ispitnog tijela HYB-2 koje je izrađeno ručnim laminiranjem. Nakon toga krivulja nastavlja rasti jer su unutrašnji slojevi ispitnog tijela HYB-2 koji su izrađeni podtlačnim ulijevanjem još uvijek cijeli i nastavljaju nositi opterećenje. Krivulja doseže drugi vrh te naglo pada kako unutrašnji slojevi ispitnog tijela HYB-2 popuštaju. Drugi vrh krivulje je manji od prvog vrha stoga je uzeto da prvi vrh krivulje predstavlja rasteznu čvrstoću (R_m) ispitnog tijela HYB-2.

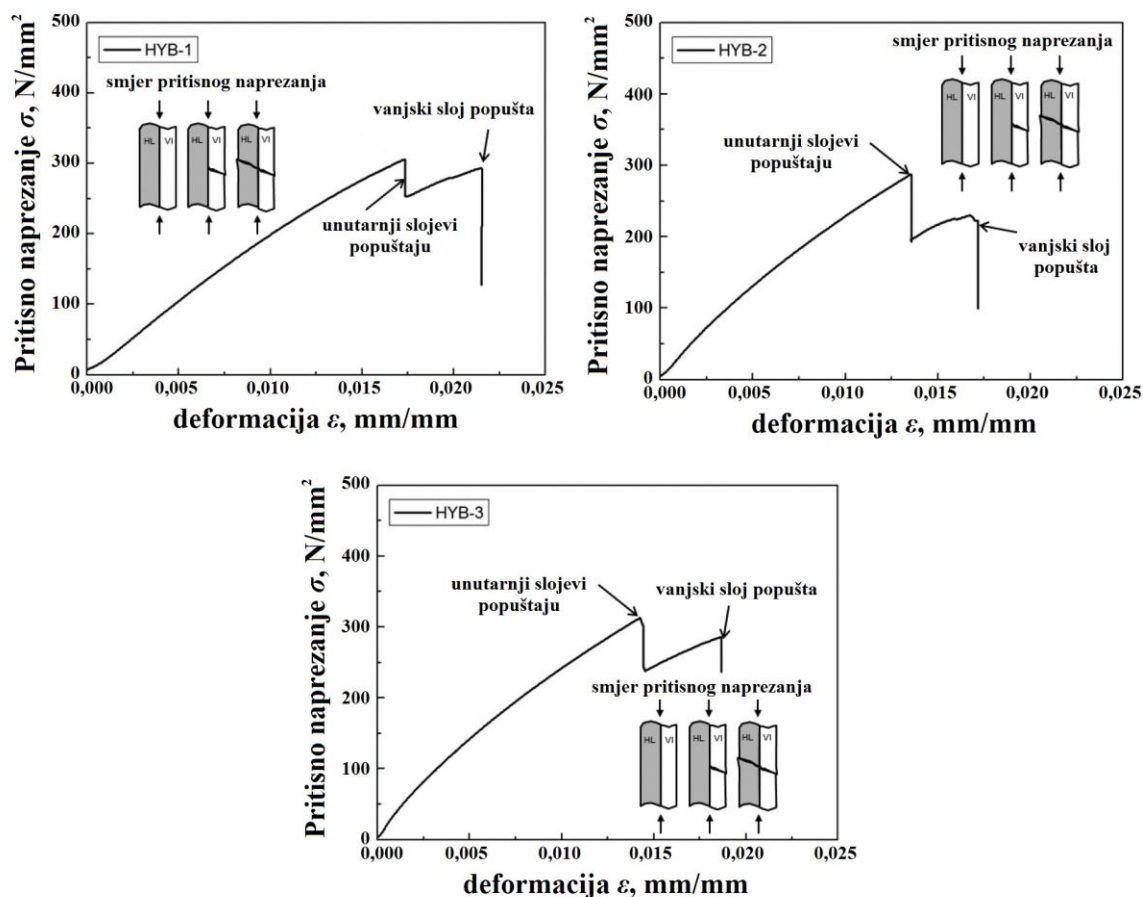
Zbog toga je rastezna čvrstoća ispitnog tijela HYB-2 iz serije 3 viša od one iz serije 1, odnosno iz tablice 4.4 može se uočiti da je prosječna rastezna čvrstoća ispitnog tijela izrađenog ručnim laminiranjem iz serije 3 približno 13 % veća od one iz serije 1, dok ispitna tijela iz serije 3 imaju nižu rasteznu čvrstoću od ispitnih uzoraka izrađenih podtlačnim ulijevanjem. U usporedbi između ispitnih tijela HYB-1 i HYB-2, dodatni sloj izrađen podtlačnim ulijevanjem na ispitnom tijelu HYB-2 nije povisio rasteznu čvrstoću tvorevine. Kod ispitnog tijela HYB-3 krivulja pri ispitivanju rastezanjem ima više vrhova zbog odvojenog popuštanja slojeva izrađenih postupkom ručnog laminiranja i postupkom podtlačnog ulijevanja (slika 4.17 c)). U ovom slučaju je drugi vrh krivulje viši stoga se ta vrijednost uzima kao rastezna čvrstoća (R_m) ispitnog tijela HYB-3. Povišenje rastezne čvrstoće uzrokovano je velikim volumenom slojeva izrađenih postupkom podtlačnog ulijevanja.



Slika 4.17. Dijagram rastezno naprezanje – istezanje [20]

Rezultati ispitivanja pritiskne čvrstoće prikazani su na slici 4.18, gdje se može vidjeti da obje strane podnose pritisno opterećenje do pojave vrha gdje se postiže najviše naprezanje te

unutrašnji slojevi izrađeni podtlačnim ulijevanje iznenada popuštaju zbog niže pritiskne čvrstoće kao što je prikazano u tablici 4.4. Iako su unutrašnji slojevi popucali, vanjski slojevi nastavljaju nositi opterećenje do konačnog popuštanja ispitnog tijela.



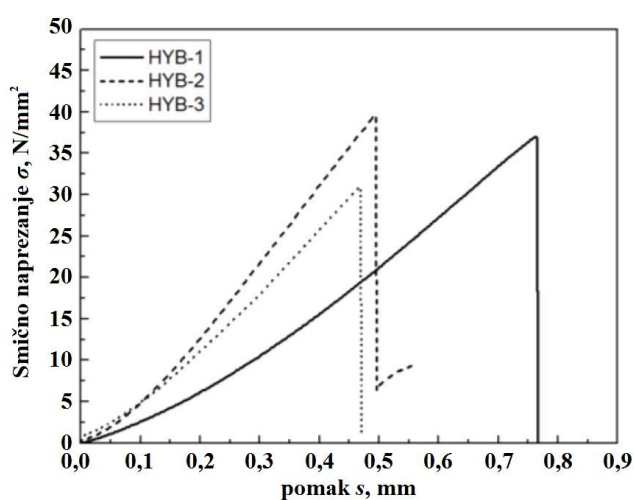
Slika 4.18. Pritisno naprezanje – deformacija [20]

Moduli rasteznosti (E_r) i modul pritisknosti (E_p) za uzorke HYB-1, HYB-2 i HYB-3 navedeni su u tablici 4.6. Oba modula rastu s povećanjem broja slojeva izrađenih podtlačnim ulijevanjem što znači da su moduli proporcionalni s masenim udjelom vlakana HYB uzoraka.

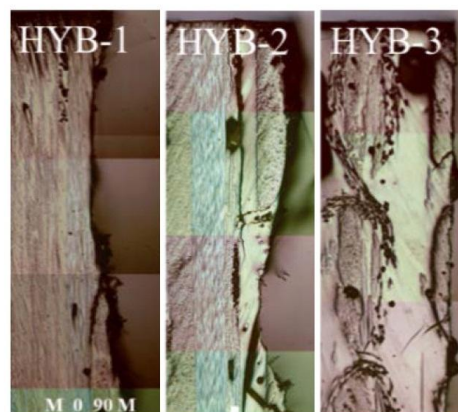
Tablica 4.6. Rastezna i pritiska svojstva za uzorke HYB [20]

	HYB-1			HYB-2			HYB-3
	Serija			Serija			Serija
	1	2	3	1	2	3	3
Rastezna č., R_m [N/mm ²]	226,2	278,1	229,8	254,6	303,5	267,9	278,5
M. rasteznosti, E_r [kN/mm ²]	14,7	13,4	11,8	16,4	15,9	15,7	18,6
Pritisna č., σ_{cm} [N/mm ²]	293,6	275,4	279,4	315,8	287,2	321,6	263,3
M. pritisknosti, E_c [kN/mm ²]	19,20	18,10	17,80	22,50	18,80	19,20	25,37

Slika 4.19 prikazuje rezultate ispitivanja smične čvrstoće za hibridna ispitna tijela. Dobivene krivulje pokazuju da je smična čvrstoća ispitnog tijela HYB-3 (30,4 MPa) slična prosječnoj vrijednosti smične čvrstoće ispitnih tijela izrađenih postupkom ručnog laminiranja (30,5 MPa). Na slici 4.19 b) može se uočiti da je do loma kod ispitnog tijela HYB-3 došlo na kontaktnoj površini između vanjskog i unutarnjih slojeva. Pukotina se širila kroz spoj matrica gdje nema vlakana što se može uočiti i kod rezultata ispitnih tijela izrađenih postupkom ručnog laminiranja i podtlačnog ulijevanja. Slično kao i kod ispitnog tijela HYB-3, prosječna vrijednost smične čvrstoće ispitnih tijela HYB-2 slične su vrijednostima ispitnih tijela izrađenih ručnim laminiranjem, a pukotina se širi na kontaktnoj površini matrica. Uočeno je da se prosječne vrijednosti smične čvrstoće ispitnog tijela HYB-1 kreću od 35,4 do 39,2 što je 16 % odnosno 29 % više od vrijednosti ispitnih tijela izrađenih postupkom ručnog laminiranja. Kao što je prikazano na slici 4.19 b), kod ispitnog tijela HYB-1 više pukotina i kontura prijeloma može se vidjeti u smjeru smicanja. Kontaktna površina između slojeva izrađenih postupkom ručnog laminiranja i podtlačnog ulijevanja najčešće je najslabije mjesto kod smicanja ali se ne nalazi blizu zareza koji je urezan u pola debljine ispitnog tijela. Zbog toga se pukotine uzrokovane smičnim naprezanjem pojavljuju na više mjesta kao što su zarezi i kontaktna površina između vanjskog i unutarnjeg sloja. Višestruki putovi pucanja mogu odgoditi lom ispitnog tijela HYB-1 što će uzrokovati povišenje smične čvrstoće tvorevine.



a) smično naprezanje - pomak



b) ispitna tijela za ispitivanje smične čvrstoće

Slika 4.19. Prikaz a) dijagrama smičnog naprezanja, b) ispitak HYB nakon ispitivanja [20]

4.5.2. Utjecaj redoslijeda tkanina u laminatu na mehanička svojstva kompozitne tvorevine [21]

U ovom ispitivanju ispitivana su mehanička svojstva kompozita izrađenih postupkom VARIM s matricom od epoksidne smole ojačane matom sa sjeckanim vlaknima i/ili obično tkanom tkaninom od E staklenih vlakana s volumnim udjelom vlakana od 22 %, 26 % i 30 %. Mat sa sjeckanim vlaknima (CSM) ima nasumično orijentirana vlakna što pruža izvrstan integritet, ali i dobro natapanje i raspodjelu smole. CSM je relativno jeftini te pokazuje nižu čvrstoću u usporedbi s obično tkanom tkaninom stoga se mat uglavnom primjenjuje za manje kalupe. Tkanine poput obično tkane tkanine (PW) prerađuju se od pređe koja ima orijentaciju $[0^\circ/90^\circ]$. Tkanine s dvosmjerno orijentiranim vlaknima pokazuju najvišu otpornost na deformaciju kada se opterete paralelno na os vlakana, a najnižu otpornost kada se opterete okomito na os vlakana. Obično tkane tkanine su savitljive i imaju visoku čvrstoću u pravcima pređe stoga se upotrebljavaju za izradu brodskih trupova, ploča, interijera automobila i dijelova kao što su brtve, kotači, ležišta i zupčanici. Materijal za matricu kao što je epoksidna smola koja osigurava izvanredno prijanjanje za tkanine kao što je mat sa sjeckanim vlaknima ili obično tkana tkanina, te postojanost matrice na degradaciju u okolišnoj atmosferi i ekonomičnost s gledišta proizvodnje čine epoksidnu smolu najprikladnijom za izradu kompozitnih tvorevina.

U ovom ispitivanju ispitana su mehanička svojstva rastezne, savojne i smične čvrstoće, te žilavost kompozita. Ispitane su četiri kombinacije CSM i PW u skladu s ASTM normama.

4.5.2.1. Materijali za izradu uzoraka

Kao materijal ojačavala upotrebljene su tkanine od E staklenih vlakana u obliku CSMa i PW. Gustoća mata sa sjeckanim vlaknima je 450 g/m^2 a obično tkane tkanine je 631 g/m^2 . U kompozitima je upotrebljena epoksidna bi-phenol-12 smola (*Lapox-L12*), a kao umreživalo trietilen tetra amin (*Lapox K6*). Gustoća smole je 1162 kg/m^3 , a umreživala 954 kg/m^3 .

Za izradu kompozitnih ploča dimenzija $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ korišten je postupak VARIM. Upotrebljen je postupak podtlačnog ulijevanja jer nudi više prednosti od postupka ručnog laminiranja, odnosno tvorevine su čvršće i lakše. Na površinu kalupa nanoseno je odvajalo radi lakšeg uklanjanja tvorevine nakon umreživanja. Tkanine ojačavala izrezane su na odgovarajuću dimenziju i postavljene u kalup. Broj slojeva i redoslijed slaganja tkanina prikazan je u tablici 4.7. Na obod kalupa postavljena je traka za brtvljenje. Zatim je postavljen

sloj *peel-ply* i infuzijska mrežica kako bi se osigurala ravnomjerna raspodjela smole u kalupu. Nakon postavljanja priključaka, kalup je zatvoren folijom za brtvljenje te su spojene linija za dobavu smole i podtlačna linija. Smola je uvedena u kalup pomoću podtlaka, a umreživanje je izvršeno pri sobnoj temperature i pri atmosferskom tlaku u trajanju od 24 h. Tvorevina je zatim izvađena iz kalupa i uklonjen je srh. Debljina kompozitne tvorevine je $h = 3$ mm.

Tablica 4.7. Redoslijed slojeva u laminatu [21]

Oznaka	Br. slojeva	Redoslijed slaganja
3PW	3	[PW/PW/PW]
2PW + 1CSM	3	[PW/CSM/PW]
1PW + 2CSM	3	[CSM/PW/CSM]
3CSM	3	[CSM/CSM/CSM]

4.5.2.2. Postupci ispitivanja

Ispitna tijela za sva ispitivanja izrezana su vodenim mlazom iz umreženih ploča.

Rastezna čvrstoća ispitana je provođenjem rasteznog ispitivanja prema normi ASTM D3039 na *Zwick Roell* univerzalnim uređaju za ispitivanje (model: *Zwick Roell Z020*, opteretivosti 20 kN) pri konstantnoj brzini od 2 mm/min. Dimenzije ispitnog tijela su $250 \times 25 \times 3$ mm.

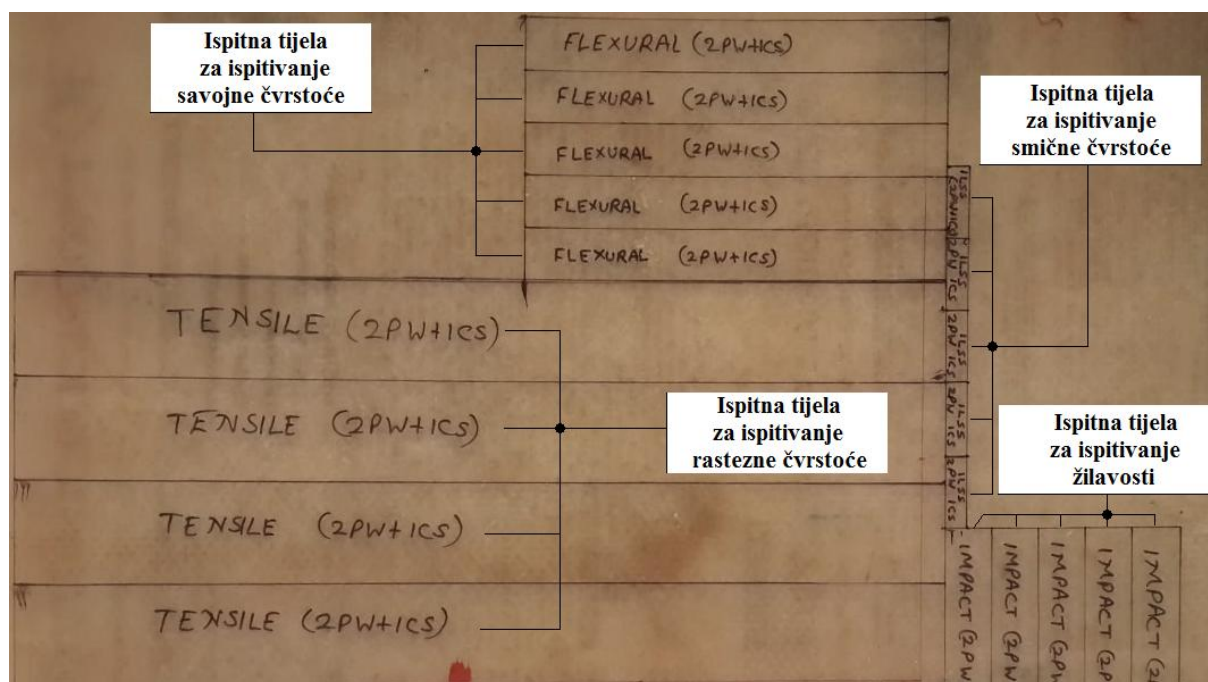
Ispitivanje savojnih svojstava u tri točke prema normi ASTM D7264 primijenjeno je kako bi se utvrdila savojna čvrstoća kompozita. Ispitivanje je provedeno na uređaju *Instron UTM* (model: *Instron 3366*) pri konstantnoj brzini od 2 mm/min. Dimenzije ispitnog tijela za savijanje su $116 \times 13 \times 3$ mm.

Interlaminarno smično naprezanje ispitano je provođenjem ispitivanja savijanja na istom *Instron UTM* uređaju prema normi ASTM D2344. Dimenzije ispitnog tijela su $18 \times 6 \times 3$ mm.

Žilavost materijala određena je prema Izodu. Ispitivanja su provedena na *Zwick Roell* uređaju (model: *Zwick Roell, HIT 50P*) prema normi ASTM D256. Dimenzije ispitnog tijela su $64 \times 13 \times 3$ mm. Ispitna tijela podvrgnuta su udarnoj energiji od 5,5 J pri teorijskoj brzini od 3,5 m/s.

Za sva ispitivanja uzeto je pet ispitnih tijela iz svake ploče prikazanih na slici 4.20. Površina loma kompozitnog uzorka proučavana je Zeissovим pretražnim elektronskim mikroskopom (e. *scanning electronic microscope*, SEM) (model *Zeiss EVO 18*, Njemačka). Na ispitna tijela nanesen je tanki sloj srebra ionskim naštrecavanjem (e. *ion sputtering*) kako bi se spriječilo

statičko nabijanje ispitnih tijela. Slike dobivene primjenom SEMa upotrebene su za proučavanje načina nastanka loma i karakteristika prijeloma.



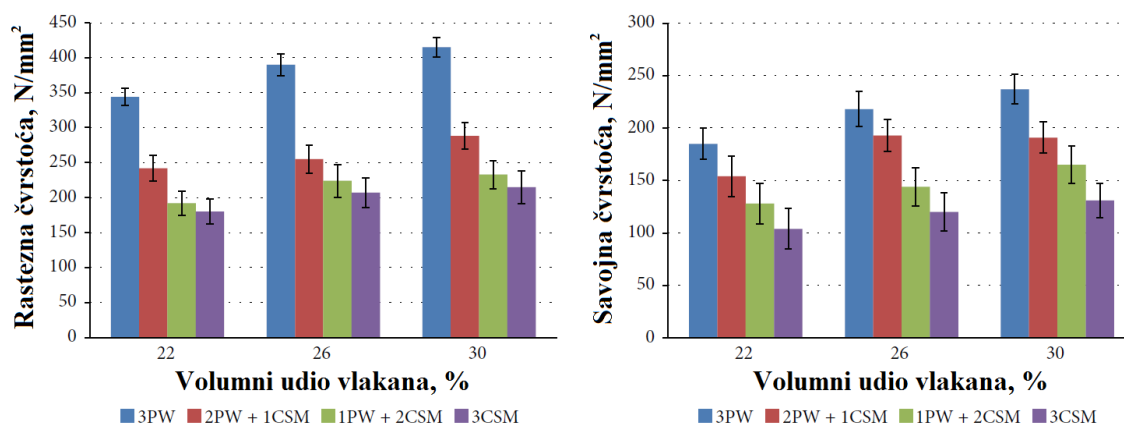
Slika 4.20. Kompozitna ploča s iscrtanim uzorcima za ispitivanje [21]

4.5.2.3. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava

Rastezna čvrstoća ispitnih tijela prikazana je na slici 4.21 a). Od svih kombinacija tkanina, najviša rastezna čvrstoća postiže se kod tvorevine s 3PW i 30 % volumnog udjela vlakana, a najniža rastezna čvrstoća postiže se kod tvorevine s 3CSM i 22 % volumnog udjela vlakana. Opaženo je da se povišenje volumnog udjela vlakana povisuje rastezna čvrstoća. Kod tvorevine s 3PW došlo je do povišenja rastezne čvrstoće od 21 % budući da je sadržaj vlakana povećan s 22 % na 30 %. Za tvorevine s kombinacijom 2PW + 1CSM povišenje rastezne čvrstoće je 19 %. Slično tome, za ostale dvije kombinacije tkanina, povišenje rastezne čvrstoće je u rasponu od 18 % do 22 %.

Slika 4.21 b) prikazuje savojnu čvrstoću ispitnih tijela. Uočeno je da je najviša savojna čvrstoća postignuta za tvorevinu s 3PW i 30 % volumnog udjela vlakana, a najniža savojna čvrstoća za tvorevinu s 3CSM i 22 % volumnog udjela vlakana. Opaženo je da se povišenjem volumnog udjela vlakana povisuje savojna čvrstoća osim kod tvorevine s 2PW + 1CSM gdje se savojna čvrstoća malo snizuje kada se sadržaj vlakana povećao s 26 % na 30 %. Kod tvorevine s 3PW došlo je do povišenja savojne čvrstoće od 28 % budući da je sadržaj vlakana

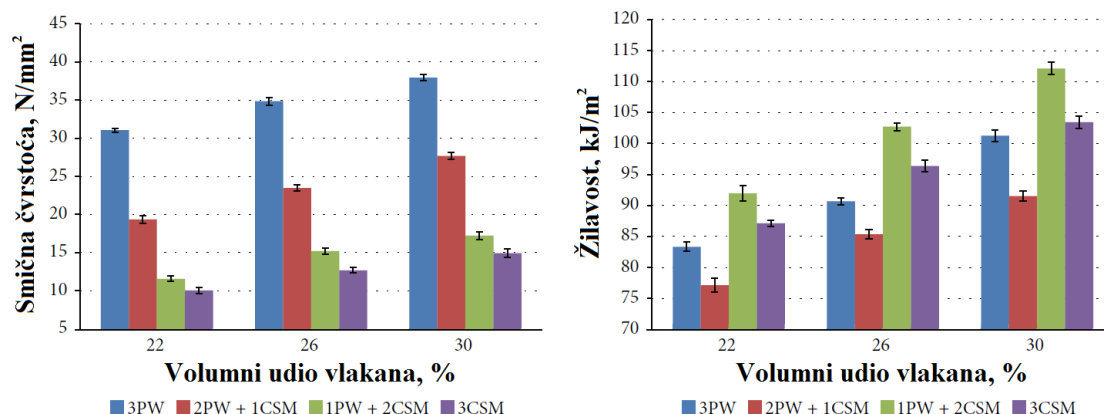
povećan s 22 % na 30 %. Za tvorevine s kombinacijom 2PW + 1CSM povišenje savojne čvrstoće je 24 %. Slično tome, za ostale dvije kombinacije tkanina, povišenje savojne čvrstoće je u rasponu od 26 % do 28 %.



Slika 4.21. Rezultati: a) rastezne i b) savojne čvrstoće [21]

Slika 4.22 a) prikazuje smičnu čvrstoću ispitnih tijela. Uočeno je da je najviša interlaminarna smična čvrstoća postignuta za tvorevinu s 3PW i 30 % volumnog udjela vlakana, a najniža smična čvrstoća za tvorevinu s 3CSM i 22 % volumnog udjela vlakana. Opaženo je da se povišenjem volumnog udjela vlakana povisuje smična čvrstoća. Kod tvorevine s 3PW došlo je do povišenja smične čvrstoće od 22 %, budući da je sadržaj vlakana povećan s 22 % na 30 %. Za tvorevine s 2PW + 1CSM povišenje smične čvrstoće je oko 43 %, a za ostale dvije kombinacije tkanina povišenje smične čvrstoće je oko 48 %.

Rezultati ispitivanja žilavosti ispitnih tijela prikazani su na slici 4.22 b). Od svih kombinacija tkanina, najviša žilavost postiže se kod tvorevine s 1PW + 2CSM i 30 % volumnog udjela vlakana, a najniža žilavost postiže se kod tvorevine s 2PW + 1CSM i 22 % volumnog udjela vlakana. Opaženo je da se povišenjem volumnog udjela vlakana povisuje žilavost. Kod tvorevine s 1PW + 2CSM došlo je do povišenja žilavosti od 22 % budući da je sadržaj vlakana povećan s 22 % na 30 %. Za tvorevine s 3CSM povišenje žilavosti je oko 18 %, a za ostale dvije kombinacije tkanina povišenje žilavosti je u rasponu od 19 % do 22 %.



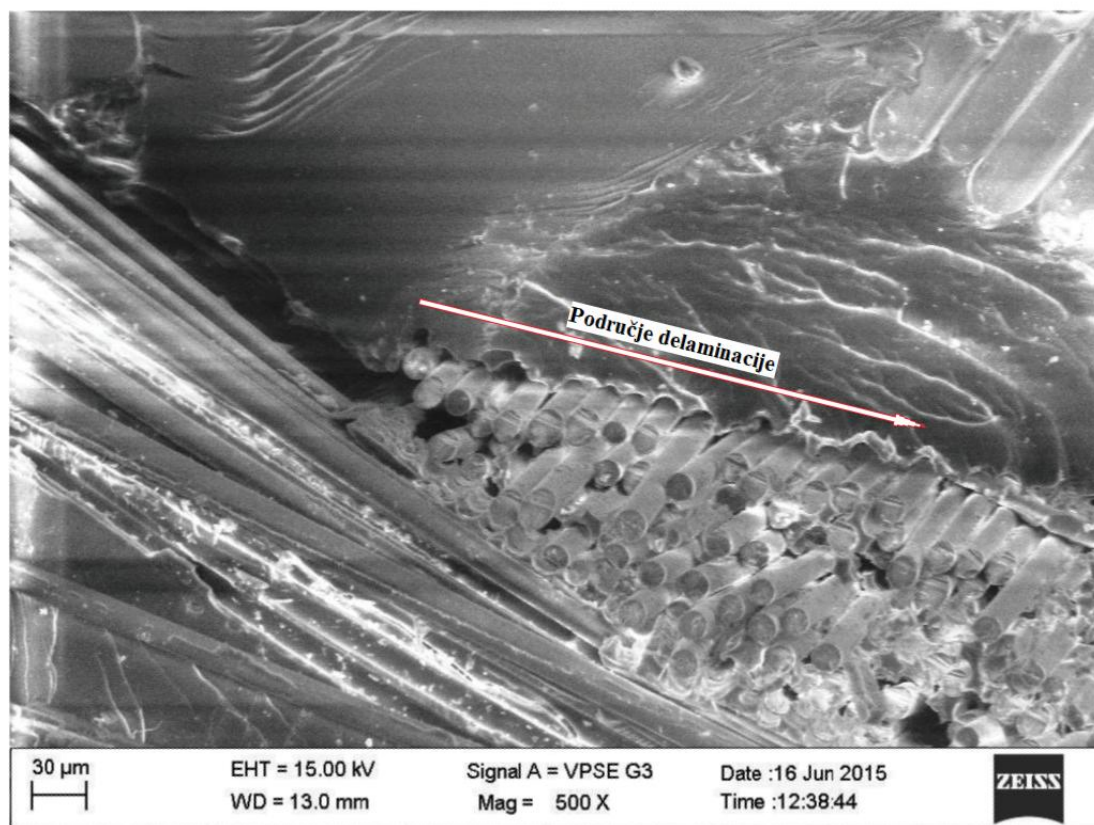
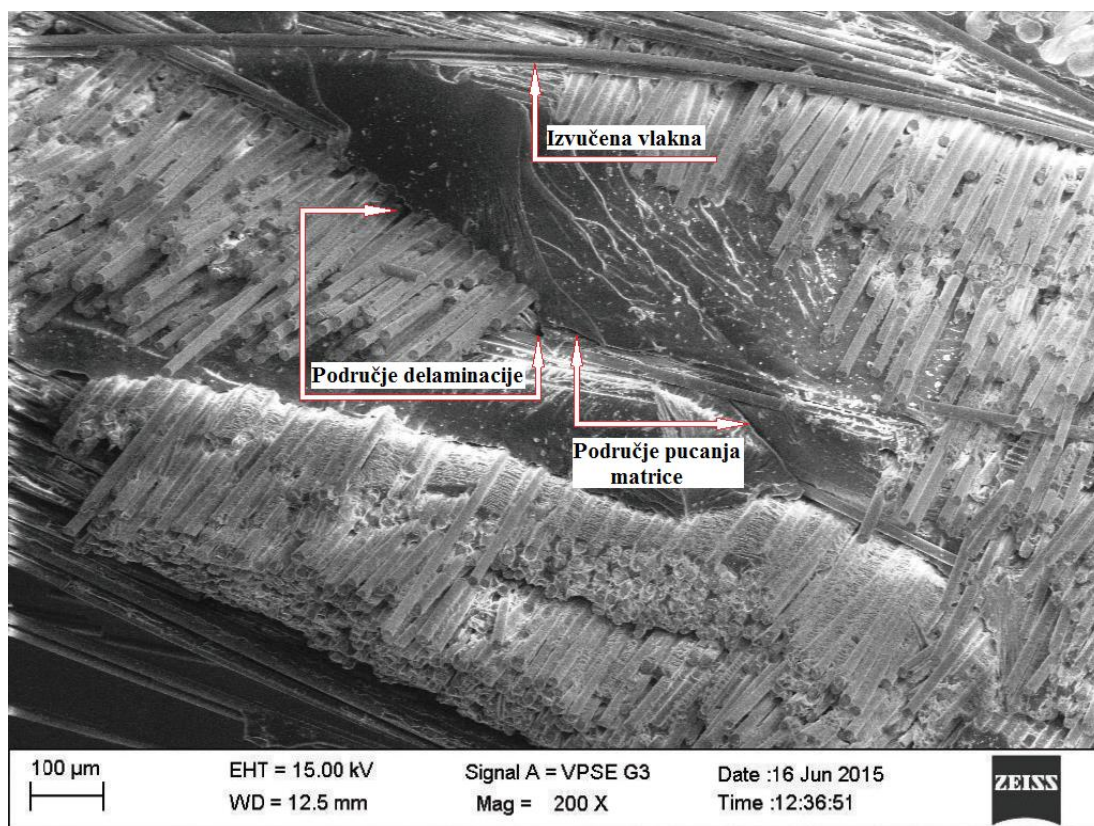
Slika 4.22. Varijacija a) smične čvrstoće i b) žilavosti [21]

Viša rastezna čvrstoća kod tvorevine s 3PW uzrokovana je ravnomjernom raspodjelom naprezanja zbog prirode obično tkane tkanine, dok niža čvrstoća kod tvorevine s 3CSM je uglavnom uzrokovana anizotropnim ponašanjem mata sa sjeckanim vlaknima. Neujednačena raspodjela naprezanja kod tvorevine s matom umetnutim između dvije obično tkane tkanine ili tvorevine s obično tkanom tkaninom umetnutom između dva mata sa sjeckanim vlaknima dovodi do lošijih svojstava kompozita. Svojstvo boljeg natapanja i veća postojanost na širenje pukotina karakteristični su za mat sa sjeckanim vlaknima, stoga kompozitne tvorevine koje imaju dva sloja mata sa sjeckanim vlaknima (1PW + 2CSM) imaju višu žilavost. Povišenje žilavosti kod takvih kompozita može se pripisati i boljem povezivanju kontaktnih površina.

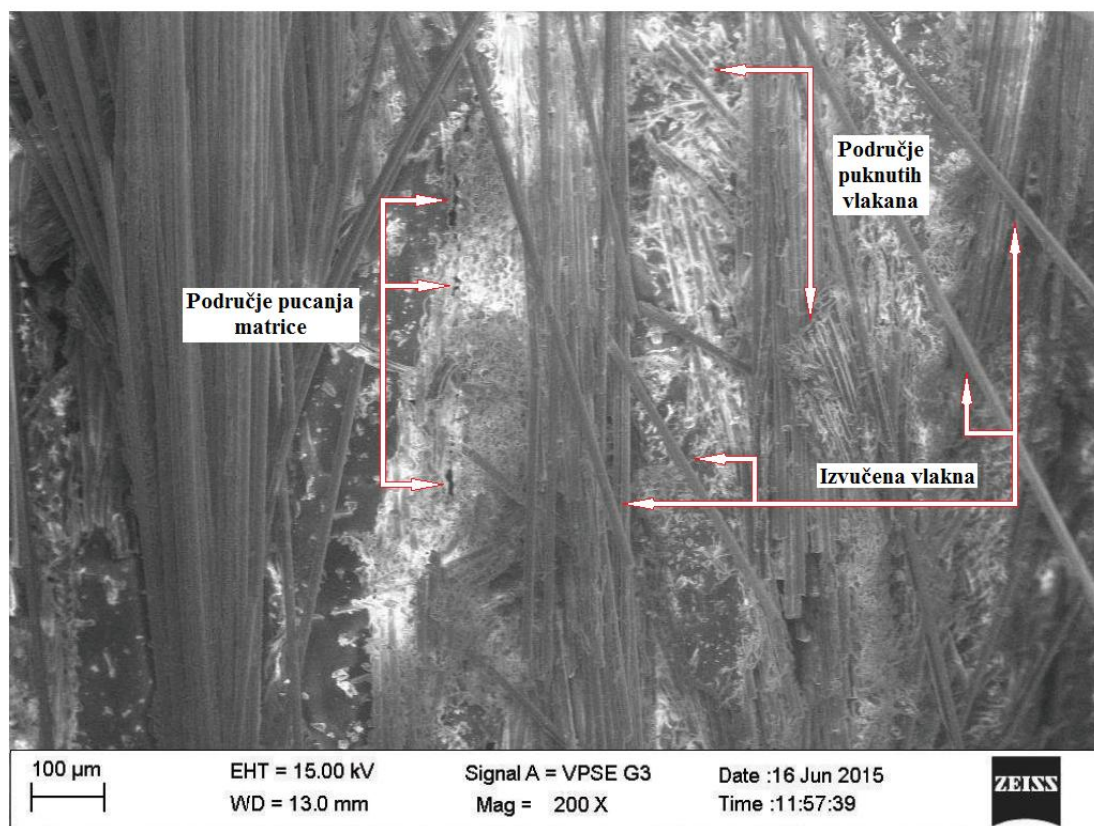
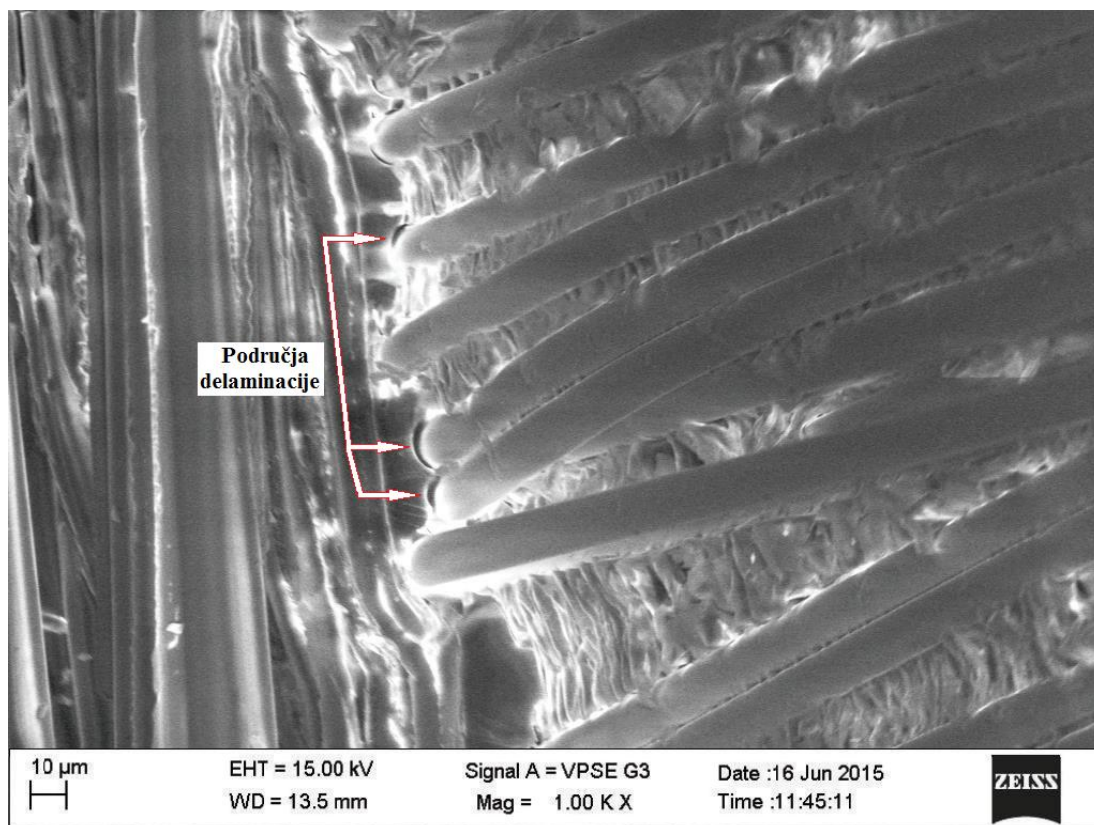
4.5.2.4. Morfologija površine loma

Slike površina loma ispitnih tijela dobivene SEMom prikazane su na slikama 4.23, 4.24 i 4.25. Za morfološko ispitivanje uzeta su samo ispitna tijela tvorevine s 3PW. Tri sloja PW tkanine mogu se jasno vidjeti kod ispitnog tijela za rastezno ispitivanje (slika 4.23). Također kod tih ispitnih tijela jasno se može uočiti delaminacija, pucanje matrice i izvlačenje vlakana. Pucanje matrice dovodi do prijevremenog loma ispitnog tijela zbog smanjenja krutosti tvorevine. Odvajanje slojeva zbog delaminacije odvija se u smjeru okomitom na opterećenje odnosno ravninu delaminacije. Karakteristike loma ispitnog tijela na savijanje (slika 4.24) ukazuju na delaminaciju, pucanje matrice, izvlačenje vlakana, te smicanje i cijepanje vlakana. Smicanje i cijepanje vlakana također se može vidjeti kod ispitnog tijela za smičnu čvrstoću (slika 4.25 a)). Izvlačenje vlakana ukazuje na loše prijanjanje između sastavnih materijala. Pucanje i pomicanje vlakana zajedno s izvlačenjem vlakana može se vidjeti kod ispitnih tijela

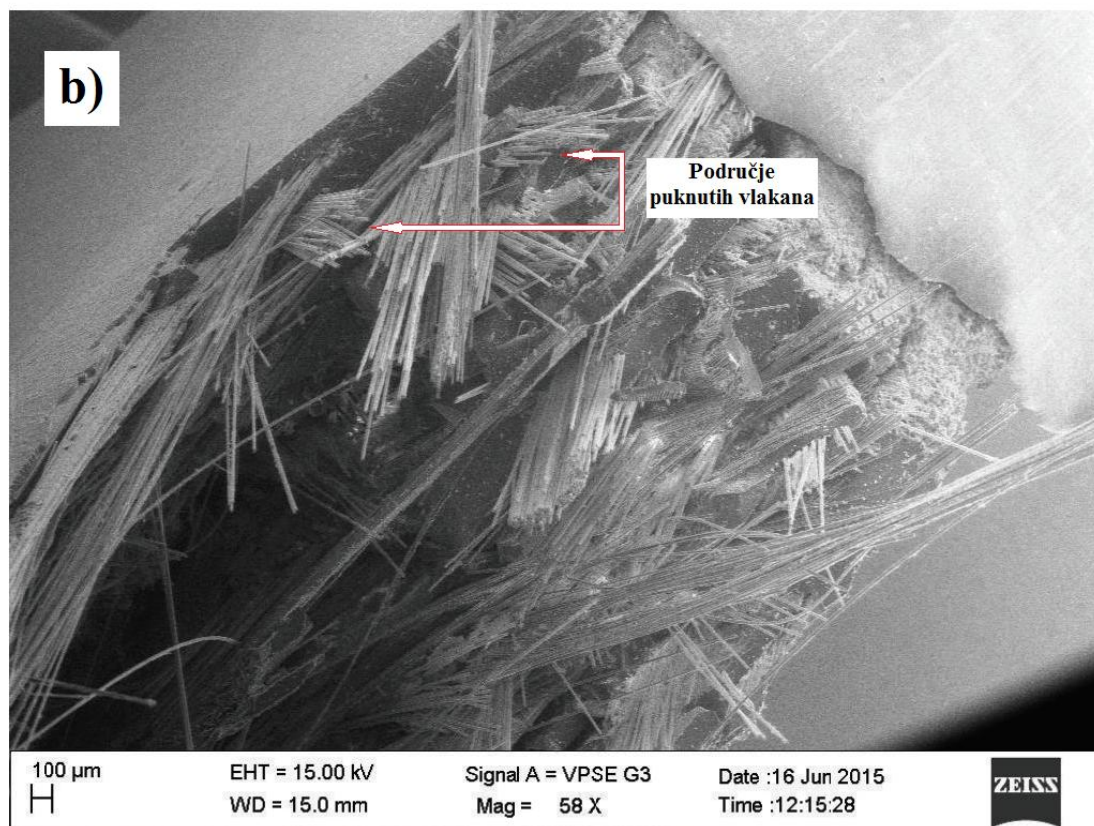
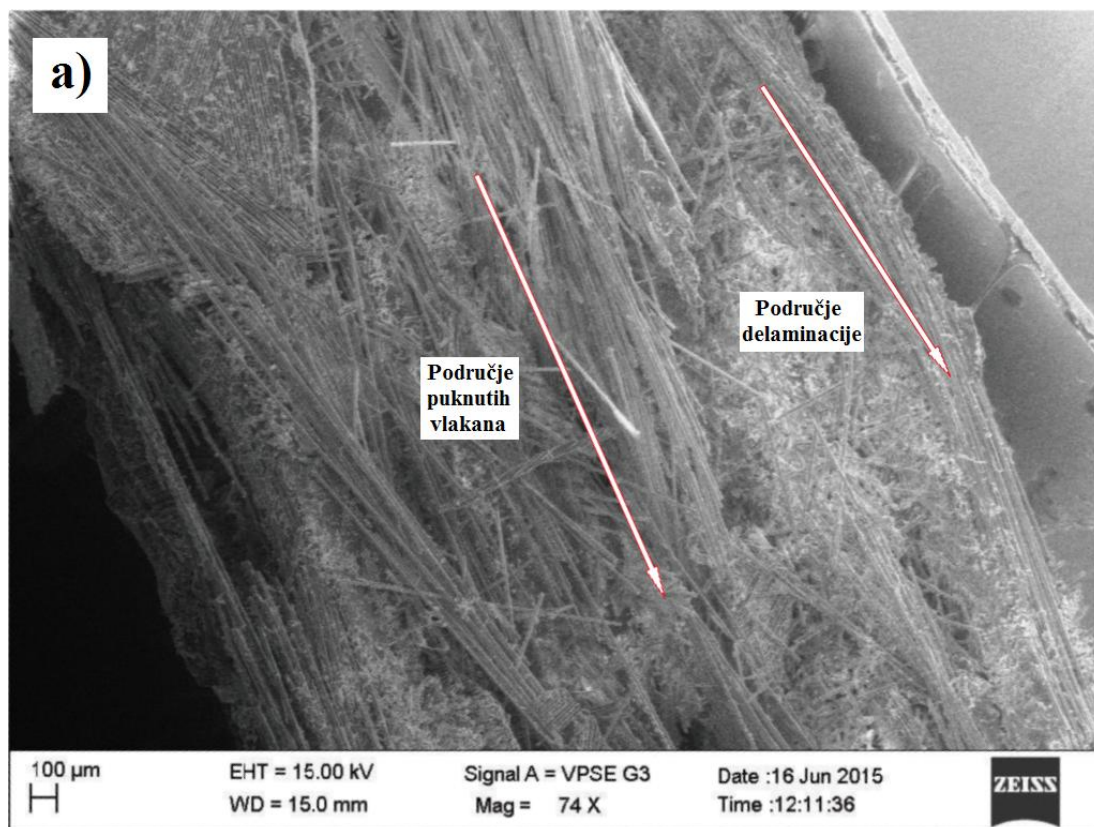
za ispitivanje žilavosti (slika 4.25 b)). Do pucanja vlakana kod ispitnih tijela dolazi zbog gustog načina tkanja tkanine koji ne dozvoljava da dođe do pomicanja vlakana.



Slika 4.23. Ispitno tijelo za rastezno ispitivanje [21]



Slika 4.24. Ispitno tijelo za savojno ispitivanje [21]



Slika 4.25. Ispitno tijelo za a) smično ispitivanje b) ispitivanje žilavosti [21]

4.5.3. Zaključci ispitivanja mehaničkih svojstava

U ovom radu su ispitivana mehanička svojstva i mehanizmi koji dovode do loma kompozita izrađenih postupkom ručnog laminiranja, podtlačnim ulijevanjem ili kombinacijom navedenih postupaka. Iz rezultata ispitivanja može se zaključiti da ispitna tijela izrađena postupkom podtlačnog ulijevanja imaju višu prosječnu rasteznu i pritisnu čvrstoću te module rasteznosti i pritisnosti u odnosu na ispitna tijela izrađene ručnim laminiranjem. Viša mehanička svojstva ispitnih tijela izrađenih podtlačnim ulijevanjem uglavnom su posljedica višeg volumnog udjela vlakna. Također ispitna tijela izrađena podtlačnim ulijevanjem imaju i višu smičnu čvrstoću u odnosu na ispitna tijela izrađene ručnim laminiranjem zbog smanjenog udjela poroznosti u strukturi ispitnih tijela.

Hibridni kompoziti pokazuju mnoga svojstva koja su karakteristična za ispitna tijela izrađena postupkom ručnog laminiranja i podtlačnog ulijevanja. Kod rasteznog ispitivanja prvo popuštaju vanjski slojevi izrađeni ručnim laminiranjem a do loma ispitnog tijela dolazi kada unutarnji slojevi izrađeni podtlačnim ulijevanjem popuste. Nasuprot tome pri pritisnom ispitivanju unutarnji slojevi izrađeni podtlačnim ulijevanjem popuštaju prvi a do loma ispitnog tijela dolazi popuštanjem vanjskog sloja izrađenog ručnim laminiranjem. Modul rasteznosti i pritisnosti proporcionalni su masenom udjelu vlakana u tvorevini. Kod smičnog opterećenja u većini slučajeva do loma dolazi na kontaktnoj površini između vanjskog i unutarnjeg sloja odnosno na površini dodira matrica neovisno o vrsti materijala. [20]

Od svih kombinacija rasporeda slojeva tkanina, tvorevina s tri obično tkane tkanine (3PW) pokazala je bolja rastezanja, savojna i interlaminarna smična svojstva od ostalih kombinacija slojeva. Tvorevina s tri sloja mata sa sjeckanim vlaknima (3CSM) pokazala je lošija svojstva od ostalih kombinacija slojeva tkanina osim žilavosti.

Najviša rastezna čvrstoća od 415 N/mm^2 je zabilježena za ispitno tijelo s tri sloja obično tkane tkanine (3PW) i volumnim udjelom vlakana od 30 %, a najniža rastezna čvrstoća od 189 N/mm^2 zabilježena je za ispitno tijelo s tri sloja mata sa sjeckanim vlaknima (3CSM) i volumnim udjelom vlakana od 22 %. Najviša savojna čvrstoća od 237 N/mm^2 zabilježena je na ispitnom tijelu s tri sloja tkane tkanine (3PW) i volumnim udjelom vlakana od 30 %, dok je najniža savojna čvrstoća od 104 N/mm^2 zabilježena za ispitno tijelo s tri sloja mata sa sjeckanim vlaknima (3CSM) i volumnim udjelom vlakana od 22 %. Najbolja postojanost na smicanje od $37,92 \text{ N/mm}^2$ uočena je u slučaju kompozita s tri sloja obično tkane tkanine (3PW) i volumnim udjelom vlakana od 30 %, dok je najniža smična čvrstoća od $10,03 \text{ N/mm}^2$

zabilježen kod kompozita s tri sloja mata sa sjeckanim vlaknima (3CSM) i volumnim udjelom vlakana od 22 %. Kompozit s jednim slojem obično tkane tkanine i dva sloja mata sa sjeckanim vlaknima (PW+2CSM) apsorbira najvišu energiju od 112,105 kJ/m² pri volumnom udjelu vlakana od 30 %, dok kompozit s dva sloja obično tkane tkanine i jednim slojem mata sa sjeckanim vlaknima (2PW+CSM) apsorbira najnižu energiju od 77,141 kJ/m² pri volumnom udjelu vlakana od 22 %. [21]

5. POSTUPCI ZAVRŠNE OBRADE

Kalupljeni proizvodi proizvedeni raznim postupcima nakon oblikovanja zahtijevaju uklanjanje srha, strojnu obradu ili prevlačenje. U sljedećem odjeljku opisani su različiti postupci završne obrade i dorade kompozitnih tvorevina.

5.1. Postupci obrade odvajanjem čestica [1]

5.1.1. *Piljenje i okrajčivanje (uklanjanje srha, e. deflashing)*

Većina kompozitnih proizvoda izlazi iz kalupa s viškom pričvršćenog materijala koji se treba ukloniti. Debljina i sastav tog srha varira ovisno o postupku kalupljenja i preciznosti alata.

Za tvorevinu koja je izravno prešana ili injekcijski prešana, debljina srha je manja od milimetara i sadrži malo ili nimalo ojačavala. Obično se može jednostavno ukloniti s nožem za rezanje, turpijom ili grubim brusnim papirom.

Tamo gdje je srh debljine više od milimetara ili sadrži visok udio ojačavala, potreban je robusniji alat za rezanje. Najprikladniji ručni alat je standardna ručna pila s oštricom za rezanje metala. Također se može primijeniti i pila za opće rezne operacije na većini kompozita.

Kako bi se povisila brzina rezanja, primjenjuje se električni alat. Ubodna pila je svestran i učinkovit alat, ali relativno spor. Kako bi se postigla visoka brzina rezanja duromernih kompozita treba primijeniti rezač s brusnim diskom visoke brzine ili disk za rezanje s dijamantnim vrhovima kako bi se postigao razuman životni vijek diska. Kružne pile mogu se primijeniti za rezanje kompozita, ali i pila i tvorevina moraju se čvrsto držati kako bi se izbjeglo izmicanje. Za složenije operacije rezanja preporučuje se rezanje mlazom vode.

Većina gore opisanih postupaka rezanja uključuje visoku brzinu rezanja površine, a neizbježan produkt obrade je stvaranje velikih količina vrlo sitne prašine. Iako nije kancerogena, učinkovito uklanjanje prašine na izvoru je neophodno za postizanje podnošljivih radnih uvjeta.

5.1.2. Bušenje

Bušenje kompozita s uobičajenim visoko brzinskim čeličnim svrdlom je jednostavno, ali postizanje čiste rupe nije. Općenito je neophodno napraviti nekoliko ispitivanja s brzinom rezanja i brzinom posmaka kako bi se postigli najbolji rezultati. Za bušenje kompozita s visokim sadržajem vlakana postoje posebna svrdla s kojima se jedino mogu dobiti kvalitetne rupe. Pile za bušenje rupa s dijamantnim vrhovima prikladne su za rezanje velikih rupa, ali tvorevina i pila moraju se čvrsto držati.

5.1.3. Blanjanje

Uporaba ručne ili visoko brzinske blanjalice se ne preporučuje kod kompozitnih materijala jer se noževi često duboko zariju u materijal i brzo potroše. Za ručno oblikovanje može se koristiti *Surform* tip blanjalice ili turpija, ali životni vijek oštrica će vjerojatno biti kratak.

Najpraktičniji način za dobivanje ravne strojno obrađene površine kompozita je pomoću remenske ili disk brusilice s karborund papirom za brušenje (silicijev karbid).

5.1.4. Tokarenje

Tokarilice za obradu drveta ili metala mogu se primijeniti za obradu kompozitnih proizvoda ali treba paziti da se tvorevina čvrsto stegne na stroj, a najbolje stezanje se postiže ako se tvorevina ostavi na kalupu. Također teško je postići visokokvalitetnu završnu obradu pri normalnim brzinama rezanja jer se materijal neujednačeno odvaja, stoga se primjenjuje visoko brzinska obrada.

5.2. Površinska obrada [1]

5.2.1. Poliranje

Kompozitni materijali uglavnom dobro reagiraju na uobičajene postupke poliranja, posebno ako postoji površinski sloj bogat smolom. Grubi karborund brusni papiri mogu se primijeniti suhi ako je površina posebno gruba, nakon čega se može primijeniti mokri papir ili suhi papir s dosta sapunice. Poliranje se može završiti s brusnim papirom 1000, nakon čega se površina mora isprati vodom i osušiti, prije nego li se nanese konačni sloj vosak koji će dati dubok sjaj. Tamo gdje je visok udio vlakana u površinskim slojevima, potrebno je izbjegavati upotrebu grubog brusnog papira ako je moguće, jer će doći do rezanja ojačavala i oštećenja materijala. U tom slučaju bolje je lagano ukloniti površinski sloj, a zatim nanijeti sloj voska.

5.2.2. Jetkanje

Premazi za jetkanje prodaju se specifično za pripremu kompozitnih materijala za kasnije bojenje. Moraju se odabrati i primijeniti s krajnjim oprezom jer je teško ograničiti kemijski učinak na površinske slojeve, stoga postoji opasnost od uništavanja strukturnih slojeva smole. Najbolja priprema za bojenje kompozita je temeljito brušenje površine kao što je opisano u nastavku teksta.

5.2.3. Bojenje

Unatoč izvrsnoj kvaliteti površine i postojanosti na koroziju kompozita, često je potrebno nanijeti površinsku prevlaku. Stoga je znatan napor stavljen u bojenje kompozitnih materijala, osobito u automobilske industriji. Razvijene su posebne temeljne boje kako bi se kompozitne tvorevine mogle prevlačiti zajedno s metalnim dijelovima na uobičajenim linijama za bojenje. U tako velikim količinama uobičajena je potpuna automatizacija bojenja.

Kod manjih količina za pravilnu pripremu površine potrebno je ukloniti sve tragove sredstava za odvajanje, voska i masnoća otapalom za čišćenje te također ukloniti sve sjajne površine finim brusnim mokrim papirom ili suhim papirom sa sapunicom. Nakon toga potrebno je oprati površinu sapunicom i temeljito je isprati i osušiti.

Može se primijeniti automobilska celuloza i polimerski lak (uz prikladnu temeljnu boju), ali za čvrstu i dugotrajnu završnu obradu površine dobro funkcioniraju dva sloja poliuretana izravno primijenjena na površinu bez prethodne pripreme.

5.3. Postupci spajanja [1]

5.3.1. Lijepljenje

Za lijepljenje najčešće se primjenjuje epoksidna, poliuretanska i akrilna ljepila.

Zadovoljavajuće zalijepljeni spojevi ovise o pravilnom izboru ljepila, ispravnoj pripremi i pažljivoj primjeni. Površine koje se spajaju moraju biti suhe, čiste i bez nečistoća, osobito prašine, ulja i voska. Ako je osnovni materijal u potpunosti umrežen, može biti potrebno pobrusiti njegovu površinu za dobivanje boljeg vezanja. Debljina lijepljenog sloja još je jedan ključni čimbenik u određivanju vrste ljepila i završenoj izvedbi spoja.

5.3.2. Zakivanje

Kompoziti su općenito krhki materijali i stoga nisu u stanju deformirati se na isti način kao metali kod lokalnih koncentracija naprezanja. Iz tog razloga se ne preporučuje upotreba uobičajenih vrsta zakovica. Međutim kada se takve zakovice upotrebe dolazi do znatnog lokalnog oštećenjem laminata, a spoj je često labav ili se zakovice izvlače.

Kako bi se izbjeglo prenaprezanje laminata, potrebna je velika kontaktna površina i stezanje laminata bez širenja tijela zakovice. Brojne vrste takvih zakovica su dostupne, od kojih su neke posebno konstruirane za upotrebu kod laminiranih materijala kao što su kompoziti.

Veličina provrta mora biti dovoljno velika da dopusti malo proširenja tijela zakovice.

Posebnu pozornost treba obratiti u slučajevima gdje laminirane površine nisu ravne, kao što je to slučaj kod ručnog dodirnog postupka. Tada zakovice moraju imati širok raspon duljina zahvata kako bi se prilagodile promjeni debljine materijala.

5.3.3. Povezivanje vijkom

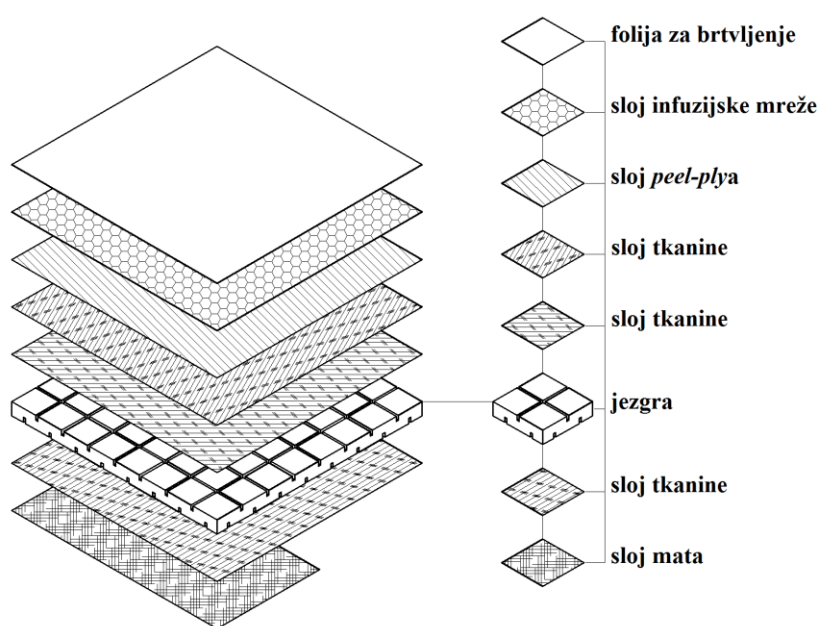
Budući da se kompozitni materijali malo deformiraju treba voditi računa o tome gdje se pojavljuju koncentracije naprezanja, a to se posebno odnosi na vijčane spojeve. Važno je točno prilagoditi veličinu provrta i vijaka te osigurati finu kvalitetu obrade kontaktne površine vijaka i provrta kako bi se ostvarila puna čvrstoća spoja. Također, zbog izrazito usmjerene prirode materijala, čvrstoća spojeva ovisi o vrsti, sadržaju i smjeru ojačavala u odnosu na primijenjeno opterećenje.

Vijčani spojevi kod kompozita mogu tijekom vremena postati labavi, stoga je preporučljivo primijeniti neku vrstu stezne matice, osobito ako je spoj izložen cikličkom ili rasteznom opterećenju.

6. EKSPERIMENTALNI DIO

Na primjeru izrade kompozitne ploče detaljno je opisan postupak podtlačnog ulijevanja te greške koje su se javile prilikom prerade i na konačnom proizvodu.

Ploča je izrađena od poliesterske smole kao matrice koja je ojačana staklenim vlaknima u obliku prošivene tkanine i mata. Za jezgru je primijenjen poli(etilen – tereftalat) PET kako bi se postigla potrebna debljina laminata a da se ne upotrebljava puno slojeva skupljih ojačavala. Na slici 6.1 prikazan je raspored primijenjenih materijala za izradu ploče.



Slika 6.1. Raspored materijala u kompozitnoj ploči

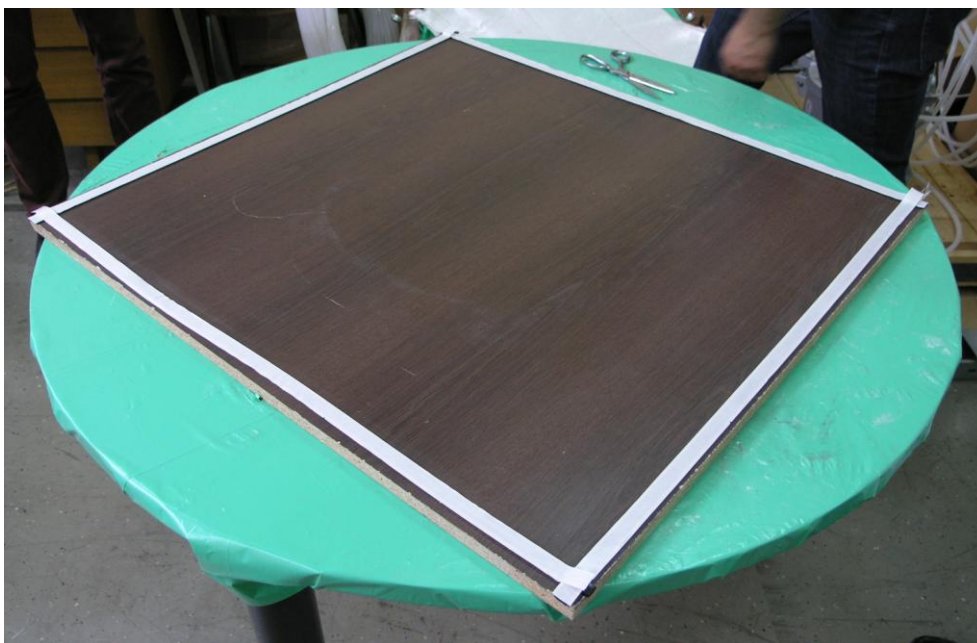
6.1. Ciljevi ispitivanja

U podtlačnom ulijevanju mat se uobičajeno ne primjenjuje, ali se ovim ispitivanjem htjelo pokazati koje se greške javljaju ako se primjeni. Također ispitivano je da li se u slučaju kada se za prvi sloj primjeni tkanina može doći do izvlačenja pojedinačnih vlakana, stoga je mat primijenjen samo na polovici početne površine (slika 6.1).

Jezgra se u kompozitu primjenjuje kako bi se postigla potrebna debljina laminata, ali i kao sloj materijala za poboljšavanje protoka smole kao što je spomenuto u poglavlju 4.2.2. U ovom ispitivanju isprobana je treća varijanta postavljanja slojeva za poboljšavanje protoka smole, odnosno primijenjena je jezgra i postavljena je infuzijska mreža na slojeve ojačavala (slika 6.1). Cilj ispitivanja bio je skratiti vrijeme ulijevanja i smanjiti sadržaj poroznosti.

6.2. Postupak podtlačnog ulijevanja

U ovom ispitivanju za kalup je upotrebljena ravna ploča od iverice dimenzija 890 x 830 mm (slika 6.2). Gornji sloj iverice prevučen je polimerom kako bi se osigurala nepropusnost zraka i smole te postigla dobra kvaliteta površine pošto je kvaliteta površine kalupa u izravnoj vezi s kvalitetom površinom konačnog proizvoda.

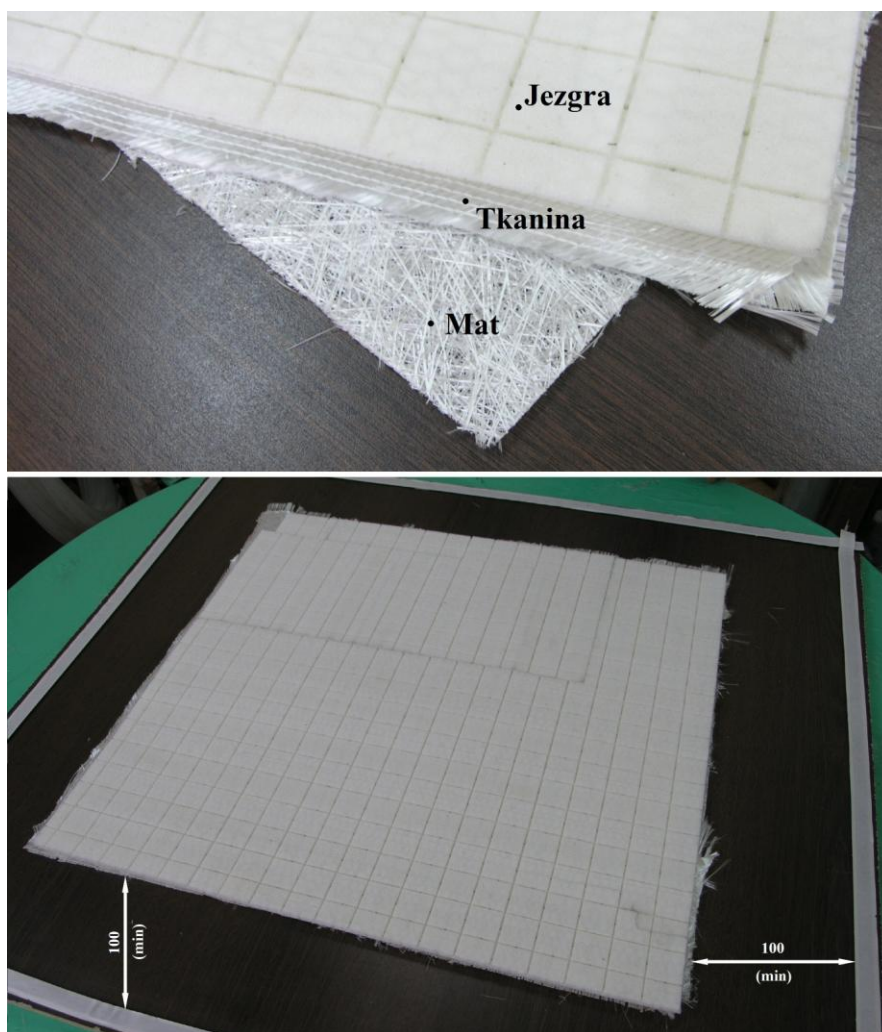


Slika 6.2. Kalup s trakom za brtvljenje folije

Na očišćenu i odmašćenu površinu kalupa nanesen je sloj odvajala u obliku voska. Kao što je u poglavlju 4.2.1 objašnjeno sloj odvajala nanosi se na kalup kako bi se spriječilo lijepljenje gotove kompozitne tvorevine za kalup, te osiguralo jednostavno odvajanje gotovog proizvoda s kalupa bez oštećenja. Pošto će kompozitna ploča umreživati pri okolišnoj temperaturi, na površini kalupa primijenjen je konvencionalni vosak za odvajanje. Cijela površina kalupa pokrivena je odvajalom, jer se tok smole ne može kontrolirati nakon što postupak započne.

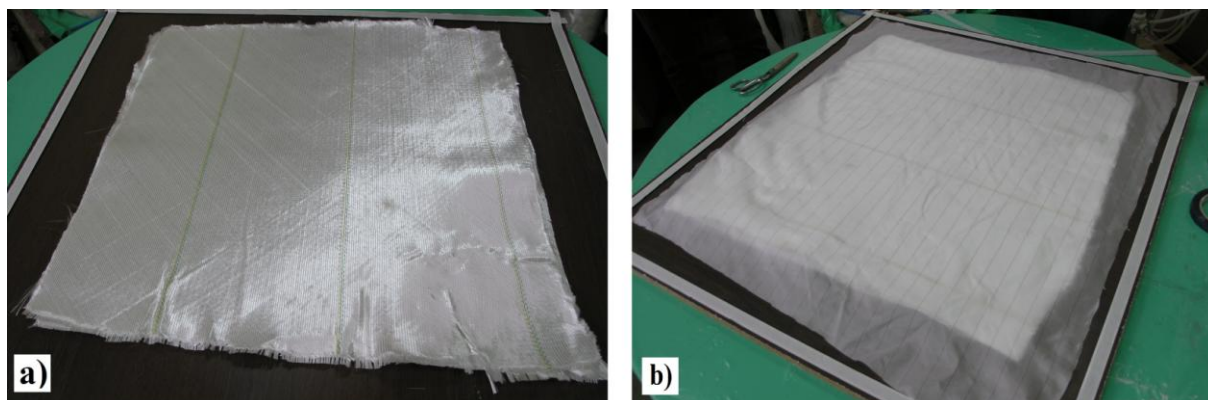
Na tako pripremljenu površinu kalupa postavljena je traka za brtvljenje folije (slika 6.2). U slučaju kada se traka postavlja nakon slaganja predoblika na površinu kalupa, potrebno je obratiti posebnu pažnju i ukloniti sva vlakna koja su ispala iz materijala prilikom postavljanja slojeva ojačavala na površinu kalupa. Niti vlakana ispod trake za brtvljenje mogu predstavljati mjesto propuštanja zraka u kalup odnosno uzrokovati otežano popunjavanje vlakana smolom. Traka za brtvljenje mora se postaviti najmanje 100 mm od ruba ojačavala / proizvoda.

Kao što je u poglavlju 4.2.2 opisano, na površinu kalupa postavljaju se ojačavala izrezana na odgovarajuću veličinu za kalupljenje (u ovom slučaju 650 x 600 mm), tako da je upotrebljen jedan komad tkanine za svaki sloj. Tipični proizvodi sastoje se od 2 do 6 slojeva tkanine, a u eksperimentu je primijenjeno 4 sloja tkanine jer je upotrebljena i jezgra. Za prvi sloj laminata postavljen je mat koji pokriva samo pola površine slagane tvorevine. Na mat je postavljena prošivena tkanina i pjenasta jezgra kao što je prikazano na slici 6.3. Ovaj način slaganja prikazan je i slikom 4.5 a) u poglavlju 4.2.2.



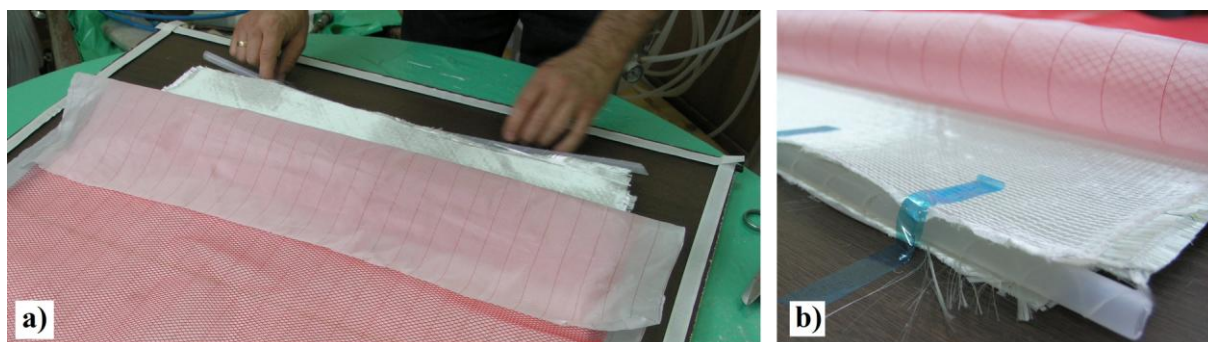
Slika 6.3. Položaj slojeva laminata (mat, prošivena tkanina, pjenasta PET jezgra)

Na jezgru su postavljena još dva sloja ojačavala u obliku prošivene tkanine i sloj *peel ply* (slika 6.4 a) b)), a zatim je postavljen sloj materijala za poboljšavanje protoka tj. infuzijska mrežica. Tkanina *peel-ply* ovdje služi za postizanje boljeg izgleda završne površine te se nakon umreživanja tvorevine uklanja s nje. U poglavlju 4.2.2 opisano je postavljanje infuzijske mrežice te je prikazano slikom 4.5 b).



Slika 6.4. Postavljanje sloja a) prošivenih tkanina, b) peel ply na već postavljene slojeve ojačavala

Nakon što su postavljeni svi slojevi tvorevine, postavljene su spiralne cijevi odnosno linija za dobavu smole i podtlačna linija (slika 6.5 a)) na osnovu teoretskog znanja iznesenog u poglavlju 4.2.3. Premda je tvorevina simetrična i relativno mala odabrano je linijsko ulijevanje zbog veće brzine ulijevanja, odnosno način postavljanja spiralnih cijevi prikazan je slikom 4.6 a). Spiralne cijevi postavljene su uz jezgru i ispod infuzijske mrežice kako bi se smola lakše mogla ulijevati. Pošto spiralna cijev prilikom postavljanja ima sklonost da se pomakne, najjednostavniji način da se to suzbije jest pričvrstiti cijevi malim komadom trake tako da se traka postavi na cijev, a zatim da se cijev pričvrsti na kalup (slika 6.5 b)).

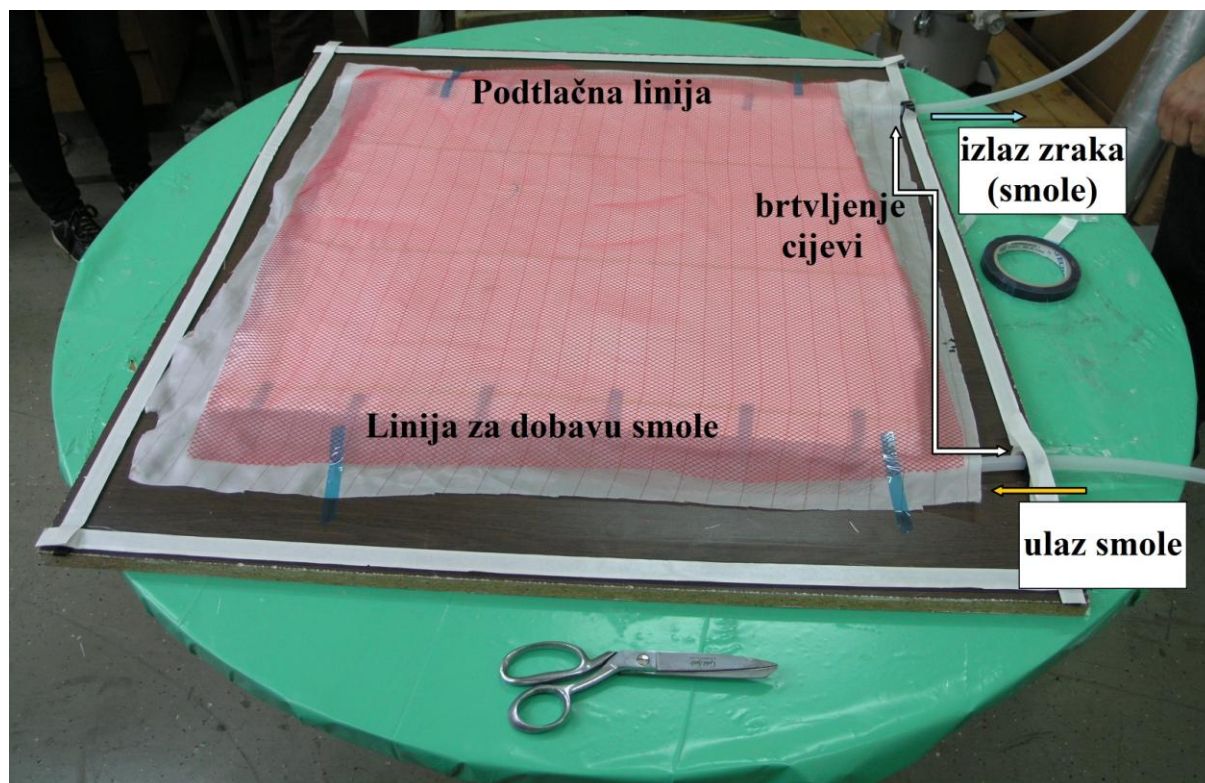


Slika 6.5. Postavljanje i pričvršćivanje spiralne cijevi

U ovom ispitivanju cijev za dobavu smole i podtlačna cijev umetnute su u spiralne cijevi odnosno nisu primijenjeni silikonski priključci zbog način postavljanja materijala u kalupu koji nije omogućavao drugačiji pristup spiralnim cijevima.

Kao što je u poglavlju 4.2.5 opisano, cijev za ulijevanje smole mora biti dovoljno dugu da se proteže od mjesta na kojem se nalazi spremnik za dobavu smole do spiralne cijevi u kalupu. Poželjno je da se cijev odreže pod kutom (npr. 45°) na oba kraja tako da kada se cijev postavi u kalup i spremnik ne dođe do slučajnog začepljenja krajeva cijevi. Postavljenu cijev potrebno

je zabrtviti na kalup omatanjem trake za brtvljenje oko mjesta spoja, a kako bi se osigurala nepropusnost brtve potrebno je čvrsto pritisnuti traku na mjestu spoja (slika 6.6). Drugi kraj cijevi postavlja se unutar spremnika za dobavu smole tako da dođe sve do dna spremnika.

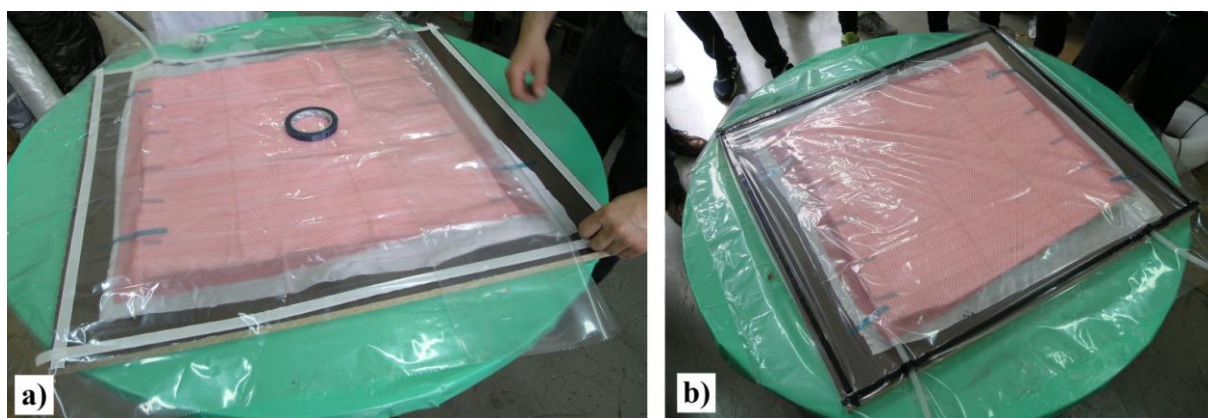


Slika 6.6. Postavljanje linije dobave smole i podtlačne linije

Ponavljanjem postupka iz prethodnog koraka druga cijev spaja spremnik za višak smole s podtlačnom spiralnom cijevi u kalupu. Postavljena cijev zabrtvljena je na kalupu pomoću trake za brtvljenje (slika 6.6). Drugi kraj podtlačne cijevi spojen je na jedan od priključaka spremnika za višak smole. Spremnik za višak smole nalazi se između kalupa i podtlačne pumpe i sprječava da višak smole iz tvorevine bude uvučen u pumpu. U spremniku je postavljena posuda tako da se smola koja ulazi u spremniku može lako ukloniti nakon završetka postupka.

Zatim je potrebno pomoću cijevi povezati podtlačnu pumpu s drugim priključkom na spremniku za višak smole kao što je opisano u poglavlju 4.2.5. Ta cijev može biti duga koliko je potrebno i neće biti uništena postupkom podtlačnog ulijevanja jer u nju ne smije ući smola što znači da se može ponovno upotrebiti za izradu sljedećeg proizvoda.

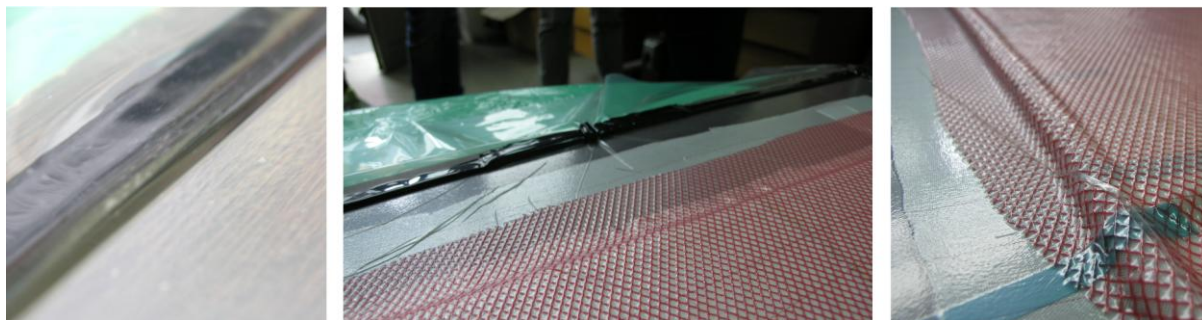
Potom je izrezana i postavljena folija za brtvljenje. Apsolutno je neophodno osigurati dovoljno folije tako da ona pritisne slojeve laminata u konture kalupa. Svako „premošćivanje“ folije gdje ona ne može izravno pristupiti kutovima kalupa dovest će do nastanka područja bogatih smolom smanjujući čvrstoću i kvalitetu gotovog proizvoda. U poglavlju 4.2.4 savjetuje se da izrezani komad folije pokriva površinu oko 50 % veću od površine kalupa, odnosno da folija treba biti napeta, ali ipak da ima dovoljno prostora za sve materijale, uključujući mrežu cijevi (slika 6.7 a)).



Slika 6.7. Zatvaranje kalupa folijom za brtvljenje

Počevši od jednog kuta, uklanjanjem dijela papira s trake za brtvljenje i pritiskanjem kuta folije za brtvljenje na izloženu traku započeto je zatvaranje kalupa. Krećući se oko kalupa i uklanjajući polagano papir s trake, na izloženu traku postavljen je i učvršćen ostatak folije. Čvrstim pritiskom folije na traku postiže se hermetično brtvljenje (slika 6.7 b)). Nakon što je folija u potpunosti postavljena, a cijev za dovod smole zatvorena započeta je podtlačna proba.

Podtlačna proba se izvodi kako bi se otkrilo postoji li negdje mjesto propuštanja zraka. Ako kod postupka izbacivanja zraka podtlačnom pumpom nije moguće postići podtlak to znači da negdje na kalupu postoji mjesto na kojem prodire zrak. Najčešća mjesta propuštanja zraka pojavljuju se na spoju trake i folije za brtvljenje, stoga je potrebno provjeriti da li negdje folija nije dobro pričvršćena za traku. Na slici 6.8 prikazana je pravilo postavljena folija što se može zaključiti jer je folija pripijena uz kalup i traku, nema nabora u području predoblika, te podtlak ostaje i nakon isključivanja podtlačne pumpe.



Slika 6.8. Postizanje podtlaka u kalupu

Nakon što je podtlak ispitan izmiješana je smola s umreživalom. U postupku je upotrebljena poliesterska smola *Aropol® G 105 E* proizvođača *Ashland*, a u tablici 6.1 navedena su neka od bitnih svojstva upotrebljene smole. Količina smole koja je potrebna za izradu tvorevina varira ovisno o veličini i količini ojačavala, odnosno za više slojeva ojačavala potrebno je i više smole. Podtlačna pumpa ponovo je uključena te je započeto ulijevanje smole u kalup iz spremnika za dobavu smole.

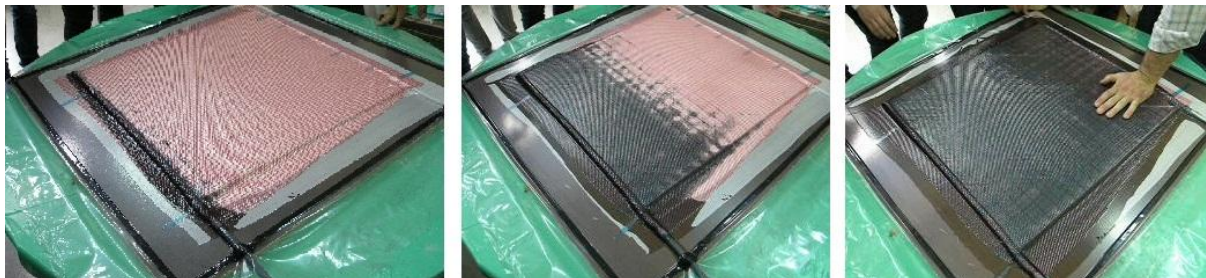
Tablica 6.1. Svojstva poliesterske smole *Aropol® G 105 E*

Svojstvo pri 23 °C	Vrijednost	Jedinica	Norma
Viskoznost	180	mPas	ISO 2884
Gustoća	1,1	kg/m ³	ISO 2811
Vrijeme geliranja (za 1 % umreživala) (otvoreno vrijeme rada sa smolom)	13	min	D006
Temperatura pri umreživanju (za 1 % umreživala)	120	°C	D006

Mehaničko svojstvo	Vrijednost	Jedinica	Norma
Rastezna čvrstoća R_m	55	N/mm ²	ISO 527
Modul rasteznosti E_r	3600	N/mm ²	ISO 527
Savojna čvrstoća σ_{fm}	90	N/mm ²	ISO 178

Postupak podtlačnog ulijevanja započinje otvaranjem kutnog ventila na cijevi za dovod smole, odnosno uvlačenjem smole u kalup podtlačnom pumpom. Brzina ulijevanja odnosno uvlačenja smole ovisi o mnogim parametrima, ali smola bi se trebala vidljivo kretati u kalupu. Na slici 6.9 može se vidjeti napredovanje toka smole kroz materijal predoblika, a cijelo ulijevanje trajalo je oko jedne minute. U poglavlju 4.4.3 na slici 4.12 prikazan je dijagram iz kojeg se može očitati teoretsko vrijeme ulijevanja i položaj fronte toka za linijsko ulijevanje,

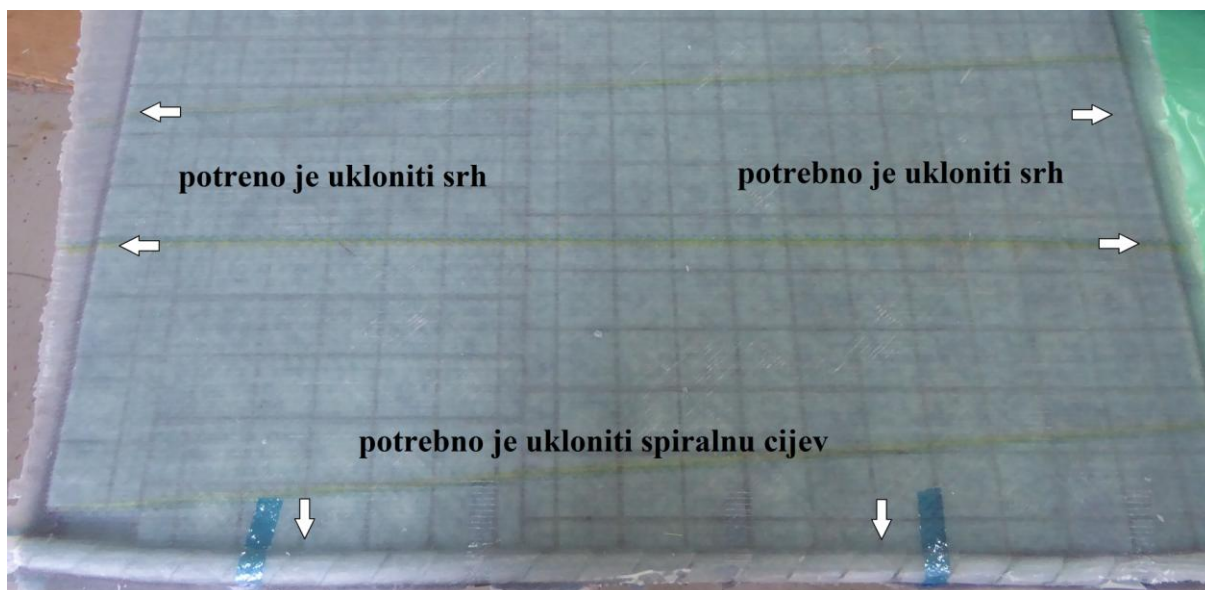
premda se za ovo ispitivanje ne može upotrijebiti zbog razlike u primijenjenim slojevima tvorevine, odnosno zbog upotrebljene infuzijske mrežice koja povisuje brzinu ulijevanja tj. skraćuje vrijeme popunjavanja kalupa.



Slika 6.9. Podtlačno ulijevanje smole u kalup

Prema preporuci iz poglavlja 4.2.7 dio smole iz kalupa pušten je da ulazi u spremnik za višak smole neko vrijeme kako bi se iz kalupa uklonili sitni mjehurići zraka u prednjem dijelu fronte toka smole. Nakon toga zatvorena je linija za dobavu smole kako bi se mogući višak smole koji je ušao u kalup i materijal mogao izvući podtlačnom pumpom.

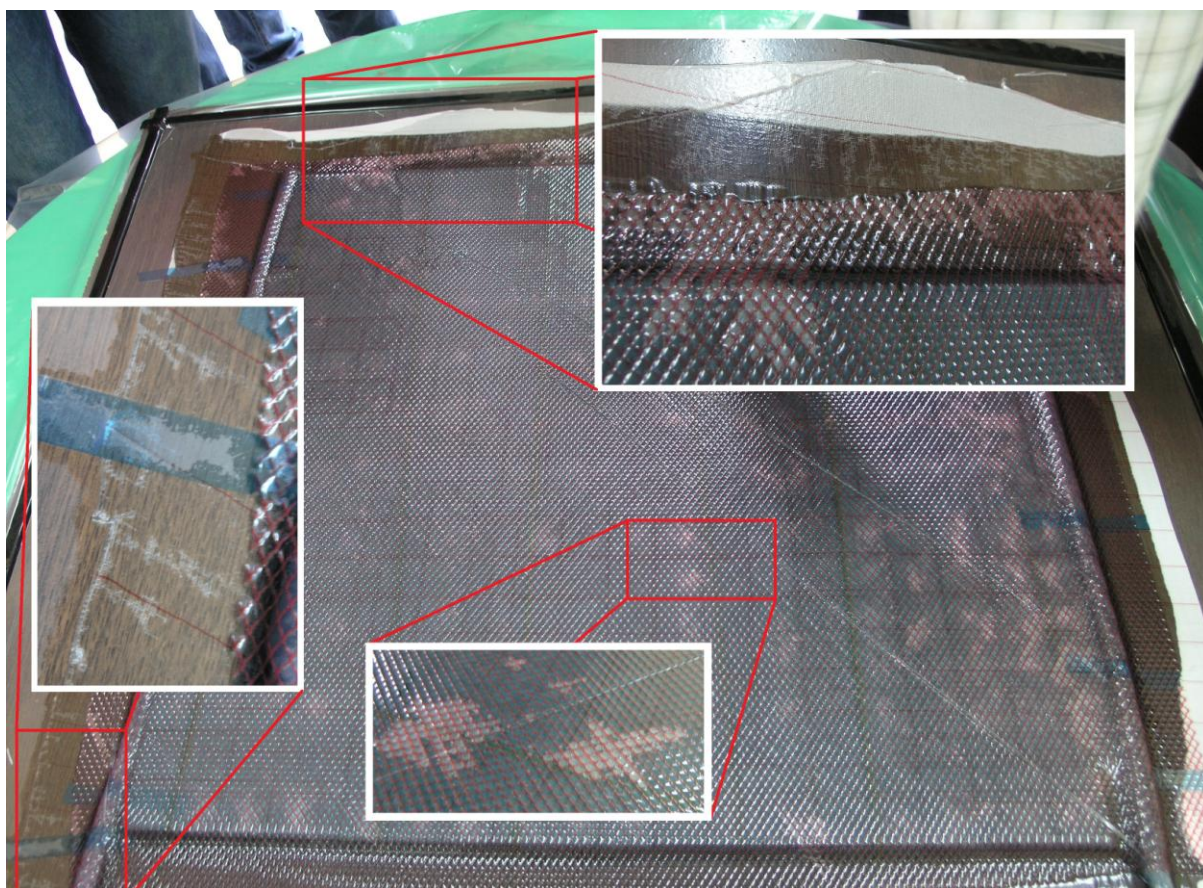
Kompozitna tvorevina ostavljena je u kalupu da umreži i nakon 24 sata je izvađena iz kalupa nakon čega je višak materijala i srh odstranjen zajedno s cijevima postupcima opisanim u poglavlju 5.1 (slika 6.10). Pošto je srh na tvorevini bio tanak i nije sadržavao vlakna ojačavala uklonjen je nožem za rezanje.



Slika 6.10. Umrežena kompozitna tvorevina

6.3. Rezultati ispitivanja

Iako je postupak proveden sukladno s teorijom iznesenom u ovom radu, kod podtlačnog ulijevanja došlo je do pojave zraka u kalup. Kao što se na slici 6.11 može vidjeti došlo je do prodora zraka ili zarobljavanja zraka (svjetlija područja) te se zrak sakupljao na površini kompozite tvorevine. Mogući uzroci prodora ili zaostajanja zraka opisani su u poglavlju 4.3.2, kao što je propuštanje zraka na brtvi ili razlika brzine ulijevanja smole zbog čega dolazi do zarobljavanja zraka u slojevima materijala. Na slici 6.11 svjetla područja na površini folije za brtvljenje vjerojatno su područja zarobljenog zraka shematski prikazana slikom 4.8 a). Za određivanje mjesta (odnosno veličine) zarobljenog zraka u samom materijalu provedeno je ispitivanje prikazano u nastavku rada.

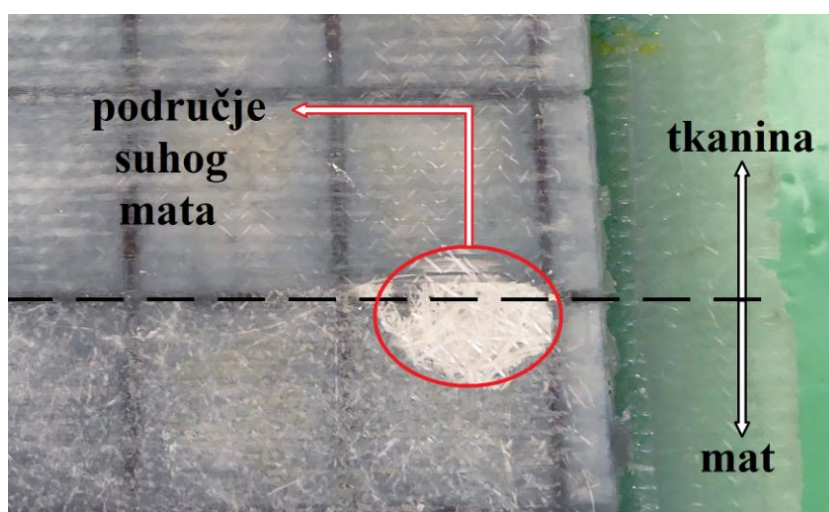


Slika 6.11. Greške prilikom podtlačnog ulijevanja

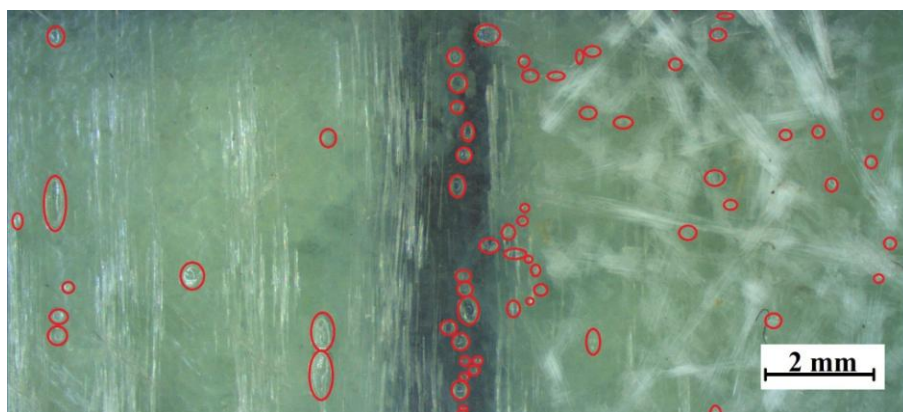
Također prilikom podtlačnog ulijevanja smola je ušla u podtlačna cijev prije nego li je cijeli laminat bio natopljen smolom, što znači da je za natapanje cijelog laminata potrošeno više smole nego što je potrebno. Stoga je potrebno primijeniti neki od postupaka opisanih u poglavlju 4.3.2, kao što je upotreba algoritama i simulacija punjenja kalupa radi određivanja

optimalnog rasporeda odnosno položaja materijala za poboljšavanje protoka smole u kalupu (slika 4.9), kako bi se ovaj problem riješio.

Detaljnom analizom obrađene kompozitne ploče uočeno je područje suhe mat tkanine blizu ruba ploče što ukazuje na probleme primjene mata za izradu tvorevina postupkom podtlačnog ulijevanja (slika 6.12). Osim ove očite greške uočeni su mjehurići zarobljenog zraka u smoli u kanalima PET pjenaste jezgre (slika 6.13), stoga su iz kompozitne ploče kutnom brusilicom izrezana ispitna tijela, dimenzija 50 x 12 mm, kako bi se utvrdila količina zarobljenog zraka u tvorevini. Slike 6.13, 6.14, 6.15, 6.16, 6.17 napravljene su na stereomikroskopu *Leica MZ6*.



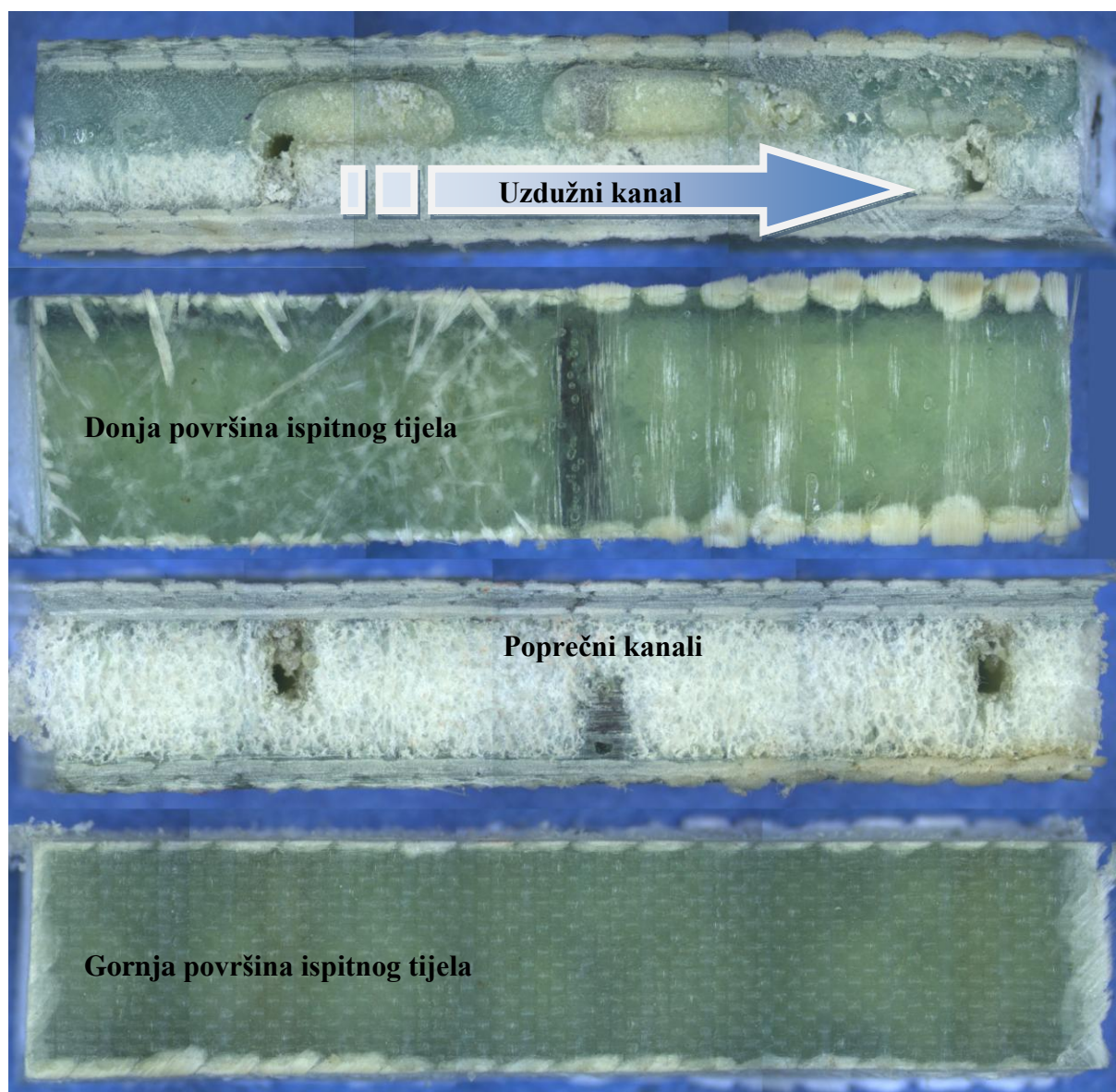
Slika 6.12. Područje suhog mata



Slika 6.13. Zarobljeni zrak u smoli na površini ispitnog tijela

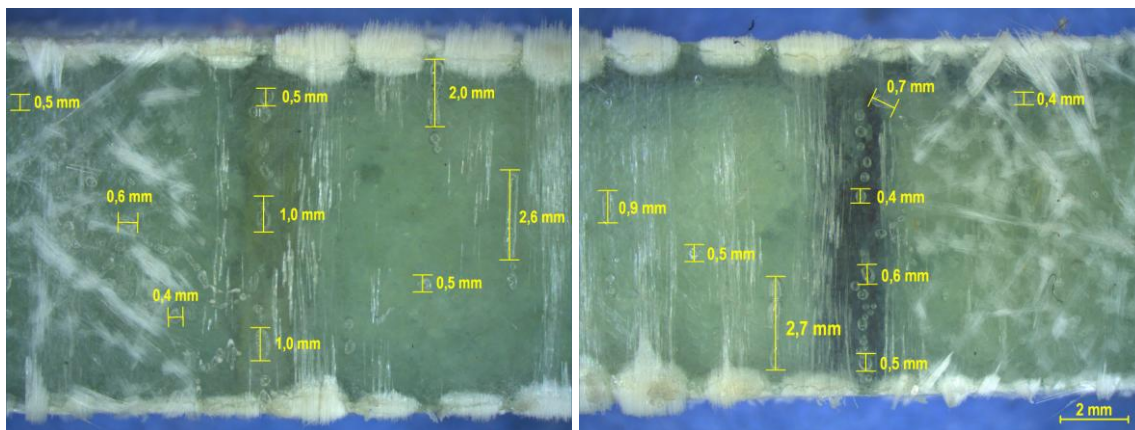
U svim ispitnim tijelima utvrđena su područja zarobljenog zraka neovisno o vrsti i količini ojačavala. U većini slučajeva zrak je ostao zarobljen u kanalima jezgre zbog razlike u brzinama strujanja smole u kalupu. Zbog dodavanja infuzijske mrežice, brzina smole u

slojevima iznad jezgre bila je znatno viša od brzine smole u slojevima ispod jezgre, kao što je prikazano u poglavlju 4.4.2 na slici 4.11, što je dovelo do zarobljavanja zraka u kanalima jezgre. Na slici 6.14 prikazano je cijelo ispitno tijelo, čiji je detalj površine prikazan slikom 6.13. Na slici 6.14 se mogu uočiti veliki mjehuri zraka u uzdužnom kanalu, te sitne uključine zraka u smoli kako u uzdužnom kanalu tako i na samoj površini ispitnog tijela, dok su poprečni kanali ispitnog tijela gotovo potpuno ispunjeni smolom. Gornja površina ispitnog tijela nema vidljivih uključina zraka, a kvaliteta površine određena je primijenjenim slojem *peel-ply* koji je u ovom slučaju uklonjen prije izrezivanja ispitnih tijela.



Slika 6.14. Ispitno tijelo s prijelazom mata na tkaninu na donjoj površini

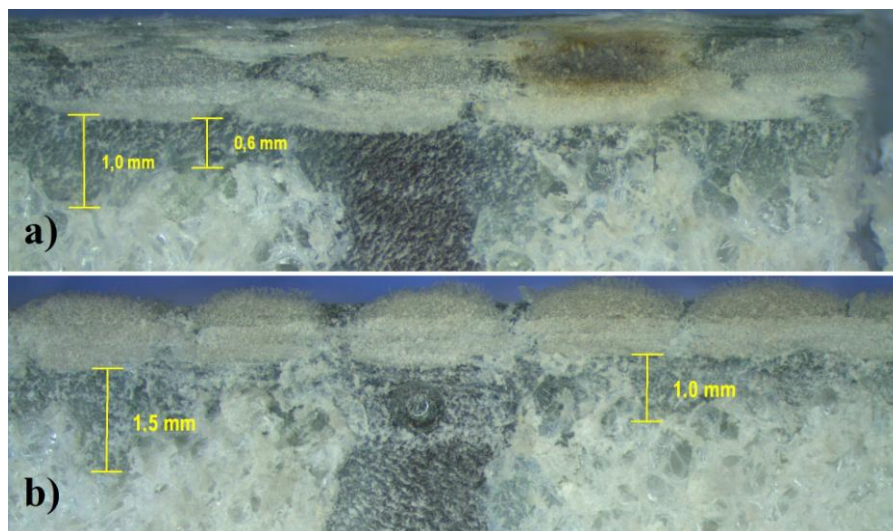
Na slici 6.15 prikazane su dimenzije uključina zraka s donje strane ispitnih tijela gdje mat prelazi na tkaninu. U oba ispitna tijela vidljivi su mjehurići zarobljenog zraka s time da su mjehurići zraka u matu manji i okrugli dok su mjehurići zraka u tkanini izduženi u smjeru protjecanja smole. Mjehurići u poprečnom kanalu jezgre vjerojatno su nastali zbog poroznosti upotrebene pjenaste PET jezgre i turbulentnog strujanja smole nastalog zbog hrapavosti stijenki poprečnog kanala.



Slika 6.15. Dimenzije zarobljenog zraka na donjoj strani ispitnog tijela

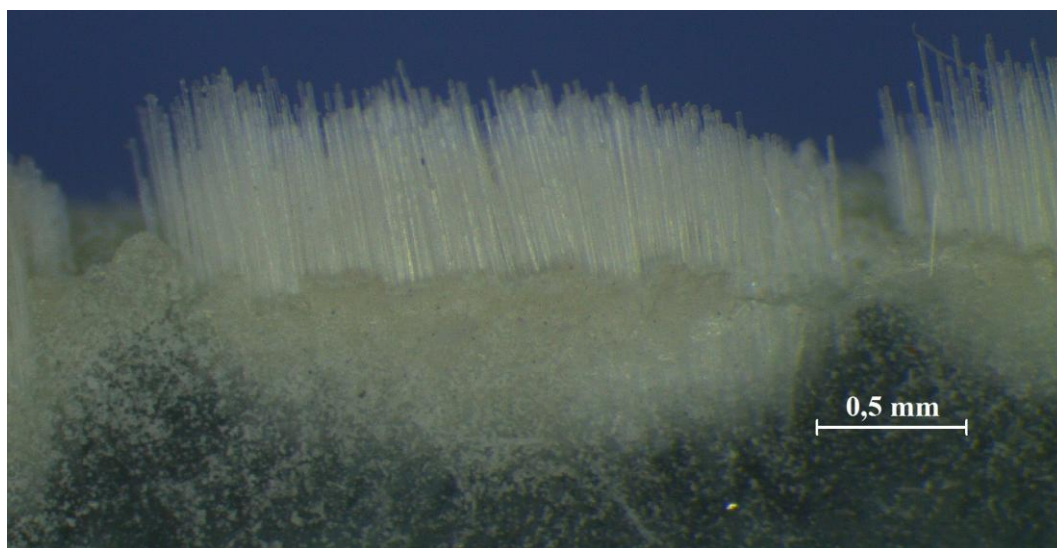
Na slici 6.16 definirane su dubine prodiranja epoksidne smole u PET pjenastu jezgru za dva ispitna tijela, s time da je na slici 6.16 a) prikazan detalj ispitnog tijela s mat tkaninom dok je na slici 6.16 b) prikazan detalj ispitnog tijela bez mata. Dubina prodiranja smole u jezgru za ispitna tijela kreće se u rasponu od 1 do 1,5 mm zbog velikih pora pjenaste jezgre, premda je cilj postupka podtlačnog ulijevanja pokušati smanjiti količinu smole koja prodire u jezgru, no takvo prodiranje smole nije moguće u potpunosti spriječiti.

Također potrebno je ostvariti dobar kontakt površine sloja ojačavala i jezgre kako bi došlo do njihovog spajanja u upotrebljenom proizvodnom postupku. Na slici 6.16 može se primijetiti da ne postoje naznake delaminacije slojeva ojačavala ili pojave mjehurića zarobljenog zraka na kontaktnoj površini odnosno području spoja ojačavala i jezgre što ukazuje na dobro povezivanje slojeva ojačavala s jezgrom.



Slika 6.16. Dubina prodiranja smole u PET pjenastu jezgru

Zbog upotrebljenog postupka izrade ispitnih tijela odnosno izrezivanja ispitnih tijela kutnom brusilicom iz ploče došlo je do mjestimičnog spaljivanja materijala kompozitne tvorevine (slika 6.16 a)), te do lokalnog pucanja matrice čime su vlakna u površinskom sloju ostala ogoljena kao što je prikazano na slici 6.17.



Slika 6.17. Pucanje matrice uzrokovano izrezivanjem ispitnog tijela

Kako je cilj postupaka prerade dobiti kompozitnu tvorevinu sa što većim udjelom ojačavala, iz izrezanih ispitnih tijela izdvojena su 3 ispitna tijela kako bi se postupkom žarenja utvrdio maseni udio vlakana u tvorevini prema normi EN ISO 1172. Rezultati ispitivanja prikazani su tablicom 6.2. Žarenje je izvršeno pri temperaturi od 600 °C u trajanju od četiri sata. Na slici 6.18 prikazana su ispitna tijela nakon izvršenog žarenja.

Tablica 6.2. Maseni udio vlakana ispitnih tijela

Ispitak	m (L)	m (L+U)	m (U)	m (L+O)	m (O)	W (O) %
Tkanina 1	26,6597	29,6515	2,9918	28,2577	1,5980	53,41
Tkanina 2	25,5815	29,2376	3,6561	27,3182	1,7367	47,50
Tkanina 3	26,0621	28,8666	2,8045	27,4864	1,4243	50,79
Prosječna vrijednost:						50,57

Ispitak	m (L)	m (L+U)	m (U)	m (L+O)	m (O)	W (O) %
Mat 1	28,6936	32,8075	4,2239	30,7773	2,0837	50,65
Mat 2	44,7812	48,9414	4,1602	46,9382	2,1570	51,85
Mat 3	21,3558	25,6642	4,3084	23,4042	2,0484	47,54
Prosječna vrijednost:						50,01

m (L) = masa lončića za ispitivanje

m (U) = masa ispitnog tijela prije žarenja

m (O) = masa ostatka ispitnog tijela nakon žarenja

W (O) = maseni udio vlakana = m (O) x m (U) x 100 %



Slika 6.18. Ispitna tijela nakon postupka žarenja

Iz dobivenih vrijednosti masenog udjela vlakana žarenjem, može se zaključiti da iako su se pri izvođenju postupka podtlačnog ulijevanja pojavile neke naznake propuštanja zraka, maseni udio vlakana i dalje je ostao visok. Postizanju visokih vrijednosti masenog udjela vlakana doprinjela je i primjena lagane pjenaste jezgre od PET-a. Tablične vrijednosti ne ukazuju da je upotreba mata značajno utjecala na maseni udio vlakana u kompozitu. S obzirom da se kompozitna tvorevina ne sastoji samo od vlakna i smole, nego i od jezgre, s dobivenih 50 % masenog udjela vlakana ojačavala u ukupnoj masi tvorevine ostvaren je osnovni cilj prerade kompozita.

7. ZAKLJUČAK

Postupak podtlačnog ulijevanja nije moguće u potpunosti parametarski opisati zbog velike dimenzijske i geometrijske promjenjivosti u različitim primjenama što u konačnici dovodi do problema. Problem brtvljenja i postizanja podtlaka kao i brzina ulijevanja koja ovisi o razlici tlakova također uvelike ograničava primjenu ovog postupka za maloserijsku proizvodnju.

Premda je u ovom radu prikazan postupak izrade jedne ploče, greške koje su se pojavile tijekom izrade najčešće se pojavljuju kod postupka podtlačnog ulijevanja i nemoguće ih je izbjeći. Kako bi se osigurala izrada kvalitetnog kompozita s potrebnim mehaničkim i uporabnim svojstvima, potrebno je unaprijed isplanirati cijeli proizvodni postupak. Na temelju ispitivanja potrebno je odrediti vrstu i količinu smole, vrstu i broj slojeva ojačavala, vrstu i debljinu jezgre u sendvič konstrukciji, vrijeme potrebno za skrućivanje polimerne tvorevine, način i mjesto postavljanja crijeva za dobavu smole, mjesta izvlačenja zraka i smole. Nažalost, kod ovog postupka kvaliteta gotovog proizvoda značajno ovisi o iskustvu i spretnosti izvoditelja postupka kao i o nizu čimbenika.

U ovom radu za izrađenu ploču potrebno je optimizirati kretanje fronte toka smole kroz materijale laminata, promjenom položaja materijala za poboljšanje toka smole ili premještanjem podtlačne cijevi kako ne bi došlo do izravnog usisavanja smole iz slojeva kompozita te zarobljavanja zraka. Također potrebno je što više spriječiti propuštanje zraka u kalup jer zaostali zrak tj. nenatopljena mjesta smolom snižavaju mehanička svojstva gotove tvorevine. Dobiveni podaci stvaraju mogućnost za daljnja ispitivanja utjecaja mata na svojstva tvorevina izrađenih postupkom podtlačnog ulijevanja.

LITERATURA

- [1] Hollaway, L.: Handbook of polymer composites for engineers, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England, 1994.
- [2] N. N.: History of Composite Materials, <http://www.mar-bal.com/language/en/applications/history-of-composites/>, 5.7.2017.
- [3] Tuttle, M. E.: Structural Analysis of Polymeric Composite Materials, CRC Press, Boca Raton, USA, 2003.
- [4] Filetin, T.; Kovačiček, F.; Indof J.: Svojstva i primjena materijala, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2011.
- [5] Pilipović, A.: Predavanja – Proizvodnja kompozitnih tvorevina, FSB, Zagreb, 2015./16.
- [6] Pomelić, L.: Predavanja – Kompoziti, Materijali i tehnološki postupci, Stručni studij elektrotehnike, 2009.
- [7] Advani, S. G.; Hsiao K. T.: Manufacturing techniques for polymer matrix composites, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England, 2012.
- [8] Kunej, W.: Poliesterski kompoziti 2, Prošireno izdanje, DIA – MAR, Rijeka, 2006.
- [9] Filetin, T.: Materijali i tehnološki razvoj, Akademija tehničkih znanosti Hrvatske, Zagreb, 2002.
- [10] N. N.: Polimerni materijali ojačani vlaknima; Tekstil u visokogradnji, www.gradimo.hr, 2009.
- [11] N. N.: Vacuum Infusion – The Equipment and Process of Resin Infusion, http://www.composites.ugent.be/home_made_composites/documentation/FibreGlast_Vacuum_infusion_process.pdf, 9. 3. 2017.
- [12] J. Indof i Đ. Španiček: Primjena sendvič konstrukcija na osnovi polimernih materijala u brodogradnji, FSB, Zagreb, 2004.
- [13] N. N.: Core Materials, <https://netcomposites.com/guide-tools/guide/core-materials/>, 22.11.2017.
- [14] N. N.: An introduction to vacuum infusion, <https://www.materialstoday.com/composite-processing/features/an-introduction-to-vacuum-infusion/>, 22.11.2017.
- [15] N. N.: Core Materials, <http://www.compositesone.com/product/core-materials/>, 22.11.2017.
- [16] N. N.: Core Materials, <http://www.easycomposites.co.uk/#!/core-materials>, 22.11.2017.

- [17] Hammami, A.; Gebart, B.R.: Analysis of the Vacuum Infusion Molding Process, <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pc.10162/abstract>, 9. 3. 2017.
- [18] N. N.: Guide to Resin Infusion – Carbon Mods, <http://www.carbonmods.co.uk/Downloads/carbon-mods-guide-to-resin-infusion.pdf>, 9.3.2017.
- [19] N. N.: Highest quality vacuum for infusion, Vacmobiles, <http://www.vacmobiles.com/>, 24. 4. 2017.
- [20] N. N.: Mechanical properties and production quality of hand-layup and vacuum infusion processed hybrid composite materials for GFRP marine structures, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2092678216301741>, 8. 11. 2017.
- [21] N. N.: Chopped Strand/Plain Weave E-Glass as Reinforcement in Vacuum Bagged Epoxy Composites, <https://www.hindawi.com/journals/jma/2015/957043/>, 8. 11. 2017.